

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Bajs

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Marko Bajs

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru doc. dr. sc. Ivi Garašiću, dipl. ing. na stručnom vođenju kroz izradu završnog rada, a posebno Matiji Bušiću, dipl. ing. na strpljenu, potpori i korisnim savjetima.

Također zahvaljujem laborantima Zdenku Batiniću, Mati Šokičiću i Krešimiru Sukobljeviću na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Marko Bajs



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO BAJŠ**

Mat. br.: 0035169432

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA I SPECIFIČNOSTI MODIFICIRANIH MAG POSTUPAKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION AND SPECIFIC ISSUES OF MODIFIED MAG PROCESSES**

Opis zadatka:

Proučiti i analizirati inačice suvremenih modificiranih MAG postupaka i usporediti ih sa konvencionalnim MAG zavarivanjem. Navesti primjere primjene modificiranih MAG postupaka u industrijskoj proizvodnji zavarenih konstrukcija. Definirati glavne mehanizme prijenosa metala u električnom luku kod modificiranih inačica s posebnim naglaskom na postupke Rapid Arc i Power Mode.

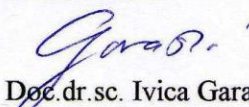
U eksperimentalnom dijelu odrediti područje primjene Rapid Arc i Power Mode postupka obzirom na vrstu i debljinu osnovnog materijala te vrstu spoja. Odrediti optimalne parametre i plinske mješavine te zavariti uzorke ručno ili automatski. Usporediti penetraciju, brzinu zavarivanja, oblik i geometriju zavara kao i operativne značajke sa konvencionalnim MAG postupkom.


Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	VIII
1. UVOD	1
2. KONVENCIONALNO MAG ZAVARIVANJE	3
2.1. Prijenos metala u električnom luku.....	5
2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima	6
2.1.2. Prijenos metala mješovitim lukom.....	6
2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom	7
2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom	7
2.2. Zaštitni plinovi	8
3. MODIFICIRANI MAG POSTUPCI ZAVARIVANJA	10
3.1. STT – Surface Tension Transfer	11
3.1.1. Prijenos metala kod STT postupka zavarivanja	12
3.1.2. Područje primjene STT postupka.....	13
3.1.3. Usporedba postupka STT i konvencionalnog MAG zavarivanja	14
3.2. FastROOT	15
3.2.1. Prijenos metala kod FastROOT postupka	15
3.2.2. Područje primjene FastROOT postupka	16
3.2.3. Usporedba postupka FastROOT i konvencionalnog MAG zavarivanja	17
3.3. RMT - Rapid MAG Technology.....	19
3.3.1. Prijenos metala kod RMT postupka.....	19
3.3.2. Područje primjene RMT postupka	20
3.4. Rapid Arc	21
3.4.1. Prijenos metala kod postupka Rapid Arc	22
3.4.2. Područje primjene postupka Rapid Arc	23
3.4.3. Usporedba postupka Rapid Arc i MAGp	24
3.5. Power Mode	25
3.5.1. Usporedba postupaka Power Mode i CV MAG	27
4. EKSPERIMENTALNI DIO	28
4.1. Cilj istraživanja	28
4.2. Općenito o opremi.....	28
4.2.1. Power Wave S350CE.....	28
4.2.2. LF 45	30
4.3. Usporedba između CV MAG i modificiranih Rapid Arc i Power Mode postupka u pogledu unosa topline	31

4.3.1. Usporedba unosa topline između CV MAG i Rapid Arc postupka	31
4.3.2. Usporedba unosa topline između CV MAG i Power Mode postupka	34
4.4. Priprema uzoraka za ispitivanje	37
4.5. Usporedba dobivenih rezultata između CV MAG i modificiranih Rapid Arc i Power Mode postupka	38
4.5.1. Usporedba dobivenih rezultata između CV MAG i Rapid Arc postupka	38
4.5.2. Usporedba dobivenih rezultata između CV MAG i Power Mode postupka	43
5. ZAKLJUČAK	51
6. LITERATURA	52
7. PRILOZI	54

POPIS SLIKA

Slika 1.	Elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu	1
Slika 2.	Lincoln Electric aparat za zavarivanje	2
Slika 3.	Shematski prikaz MAG postupka za zavarivanje (a) i proces taljenja (b) [1]	3
Slika 4.	Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [6]	6
Slika 5.	Shematski prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [6]	6
Slika 6.	Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [6]	7
Slika 7.	Grafički prikaz impulsnog postupka i način odvajanja kapljice [7]	7
Slika 8.	Utjecaj različitih plinova na oblik i penetraciju zvara [1]	9
Slika 9.	Dinamička značajka $1-U=f(t)$; $2-I=f(t)$ STT postupka [9]	11
Slika 10.	Izgled zvara ovisno o jakosti pozadinske struje [10]	11
Slika 11.	Izgled zvara ovisno o duljini električnog luka [11]	12
Slika 12.	Prikaz odvajanja kapljice kod CV MAG i STT postupka zavarivanja [10]	13
Slika 13.	Provar korijena STT postupkom kod: a) većeg razmaka i b) smaknuća [9]	14
Slika 14.	Dinamička značajka $1-U=f(t)$; $2-I=f(t)$ postupka FastROOT [9]	15
Slika 15.	Oblik krivulje jakosti struje FastROOT postupka za jedan ciklus [14]	16
Slika 16.	Slijed odvajanja kapljice kod FastROOT postupka [9]	16
Slika 17.	Utjecaj sekundarnog strujnog pulsa na oblik provara kod postupka FastROOT [14]	16
Slika 18.	Razmak između materijala „V“ spoja 3 mm i izgled zvara kod postupka FastROOT [14]	17
Slika 19.	Jakost struje u ovisnosti o brzini žice [16]	19
Slika 20.	Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom (materijal: čelični lim) [16]	20
Slika 21.	Usporedba pojave štrcanja kod MAGp(1) i Rapid Arc (2) postupka [17]	21
Slika 22.	Prikaz prijenosa metala postupkom Rapid Arc [17]	22
Slika 23.	Slijed odvajanja kapljice kod postupka Rapid Arc [24]	23
Slika 24.	Primjeri primjene postupka Rapid Arc i izgled zvara [17]	23
Slika 25.	Usporedba MAGp i Rapid Arc postupka u ovisnosti napona i brzine zavarivanja [17]	24
Slika 26.	Ovisnost napona i brzine elektrodne žice kod CV MAG i Rapid Arc postupka [17]	24
Slika 27.	Kutni i zaobljeni zavareni spoj primjenom Power Mode postupka [18]	25
Slika 28.	Prikaz odnosa napona/struje pri konstantnoj struji, naponu i snazi Power Mode postupka [18]	26
Slika 29.	Održavanje konstantne snage pomoću Power Mode postupka [18]	26
Slika 30.	Usporedba vremenskog odziva između Power Mode i CV MAG postupka [18]	27
Slika 31.	Lincoln Electric uređaj za zavarivanje (1. Izvor struje s dodacima, 2. Kontrolni panel, 3. Elektronički modul)	28
Slika 32.	Uređaj za zavarivanja Power Wave S350CE [21]	29
Slika 33.	LF 45 dodavač elektrodne žice [22]	30
Slika 34.	Unos topline u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Rapid Arc) i različitoj brzini zavarivanja	33
Slika 35.	Unos topline u ovisnosti u postupku (CV MAG ili Power Mode) pri jednakim brzinama zavarivanja	36
Slika 36.	Unos topline u ovisnosti brzine zavarivanja kod postupka Power Mode	36

Slika 37.	Unos topline u zavisnosti od postupka (CV MAG ili Power Mode) pri različitim brzinama zavarivanja.....	37
Slika 38.	Makroizbrusak uzorka 1. - CV MAG.....	38
Slika 39.	Makroizbrusak uzorka 2. - CV MAG.....	39
Slika 40.	Makroizbrusak uzorka 3. - Rapid Arc	40
Slika 41.	Makroizbrusak uzorka 4. - Rapid Arc	41
Slika 42.	Penetracija u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Rapid Arc).....	42
Slika 43.	Makroizbrusak uzorka 1. - CV MAG.....	43
Slika 44.	Makroizbrusak uzorka 2. - CV MAG.....	44
Slika 45.	Makroizbrusak uzorka 3. - Power Mode	45
Slika 46.	Makroizbrusak uzorka 4. - Power Mode	46
Slika 47.	Makroizbrusak uzorka 5. - Power Mode	47
Slika 48.	Makroizbrusak uzorka 6. - Power Mode	48
Slika 49.	Penetracija u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Power Mode) pri jednakoj brzini zavarivanja i brzini žice.....	49
Slika 50.	Penetracija u ovisnosti brzine zavarivanja i brzine žice kod Power Mode postupka	49
Slika 51.	Penetracija u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Power Mode) i brzini zavarivanja	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela zaštitnih plinova za MAG zavarivanje po HRN EN ISO14175 i njihova primjena. [4]	8
Tablica 2. Usporedba STT postupka i konvencionalnog MAG postupka kod polaganja korijenskog zavora. [13]	14
Tablica 3. Prikaz parametara kod usporedbe konvencionalnog MAG i FastROOT postupka [15]	17
Tablica 4. Tehnički podaci za Power Wave S350CE [21]	29
Tablica 5. Tehnički podaci za LF 45 [22]	30
Tablica 6. Prikaz ulaznih parametara kod CV MAG, Rapid Arc i Power Mode postupka	31
Tablica 7. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 1. i 2. primjenom CV MAG postupka (8 mm)	32
Tablica 8. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 3. i 4. primjenom Rapid Arc postupka (8 mm)	32
Tablica 9. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 1. i 2. primjenom CV MAG postupka (3 mm)	34
Tablica 10. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 3., 4., 5. i 6. primjenom Power Mode postupka (3 mm)	35
Tablica 11. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 1. (8 mm)	38
Tablica 12. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 2. (8 mm)	39
Tablica 13. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 3. (8 mm)	40
Tablica 14. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 4. (8 mm)	41
Tablica 15. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 1. (3 mm)	43
Tablica 16. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 2. (3 mm)	44
Tablica 17. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 3. (3 mm)	45
Tablica 18. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 4. (3 mm)	46
Tablica 19. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 5. (3 mm)	47
Tablica 20. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 6. (3 mm)	48

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
---------	------

Al	Aluminij
Ar	Argon
CO	Ugljični monoksid
CO ₂	Ugljični dioksid
Cu	Bakar
H ₂	Vodik
He	Helij
LF-45	Linc Feed 45
MAG C	Metal active gas (zaštitni plin: CO ₂)
MAG M	Metal active gas (zaštitni plin: mješavine)
MAG	eng. Metal active gas
MAGi	Metal active gas, mixed arc
MAGk	Metal active gas, short arc
MAGp	Metal active gas, pulsed arc
MAGs	Metal active gas, spray arc
Mn	Mangan
Ni	Nikal
O ₂	Kisik
PA 1G	Cijev rotira, os i položaj horizontalni
PB	Položaj zavarivanja: horizontalno vertikalni položaj
PG	Položaj zavarivanja: vertikalno prema dolje
RMT	Rapid MAG Technology
Si	Silicij
STT	Surface Tension Transfer
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	Duljina
a	mm	Nominalna debljina zavora
a_1	mm	Stvarna debljina zavora
b	mm	Širina
b	mm	Nadvišenje lica zavora
d	mm	Promjer elektrodne žice
d	mm	Debljina materijala
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
m	kg	Masa
P	W	Snaga
p	mm	Penetracija
Q	kJ/mm	Unos topline
q	l/min	Protok zaštitnog plina
U	V	Napon
v	m/min	Brzina elektrodne žice
v	mm	Visina
v_{zav}	cm/min	Brzina zavarivanja
η	-	Koeficijent iskoristivosti
θ	°C	Celzijev stupanj

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je „Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka“. Sastoji se od dva dijela, teoretskog i praktičnog.

U prvom dijelu rada analizirane su suvremene inačice modificiranih MAG postupaka koje su uspoređene sa konvencionalnim MAG zavarivanjem. Navedeni su primjeri primjene modificiranih MAG postupaka u industrijskoj proizvodnji zavarenih konstrukcija. Definirani su glavni prijenosi metala u električnom luku kod modificiranih inačica s posebnim naglaskom na postupke Rapid Arc i Power Mode.

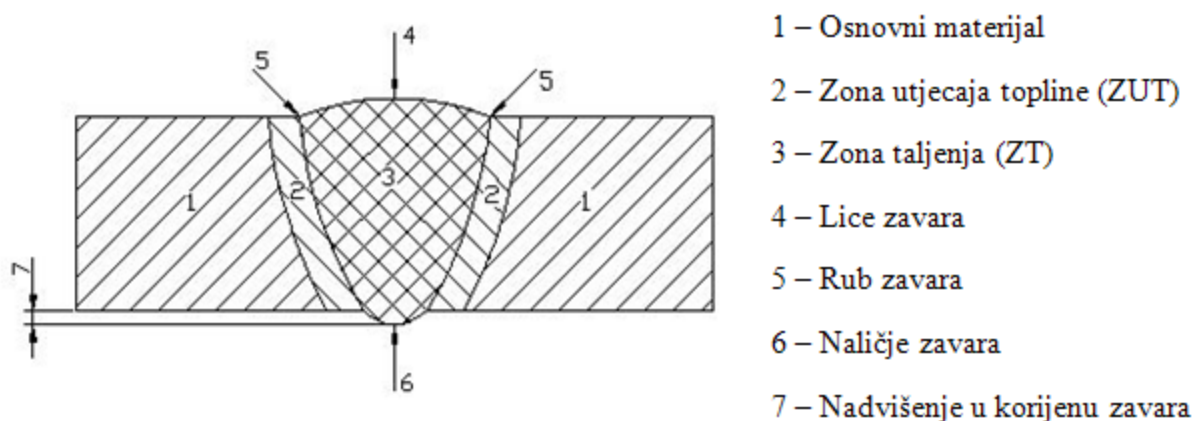
Drugi dio temelji se na eksperimentalnom dijelu u kojem je potrebno odrediti područje primjene Rapid Arc i Power Mode postupka obzirom na vrstu i debljinu osnovnog materijala te vrstu spoja. Određivanje optimalnih parametara i plinskih mješavina te zavarivanje uzoraka automatskim postupkom. Data je usporedba penetracije, brzine zavarivanja, oblika i geometrije zvara kao i operativne značajke sa konvencionalnim MAG postupkom.

Ključne riječi: modificirani MAG postupak, konvencionalni MAG postupak, prijenos metala u električnom luku, Rapid Arc, Power Mode, penetracija, brzina zavarivanja

1. UVOD

U današnjoj tehnologiji zavarivanje igra veliku ulogu, može se reći da je bez zavarivanja nezamislivo spajanje nekih materijala u gotove proizvode (automobili, kotlovi, brodovi, nosači, ...). Prilikom izrade zavarenih konstrukcija postavljaju se različiti kriteriji. To su dakle zahtjevi za sigurnost zavarenih spojeva, minimalni troškovi u pogledu utroška energije, materijala, te se mora voditi briga o neonečišćenju čovjekove okoline.

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istih ili različitih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodatnog materijala, u cilju dobivanja homogenog spoja zadovoljavajuće kvalitete. Na slici 1. prikazan je poprečni presjek zavora sa osnovnim elementima zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu.



Slika 1. Elementi zavarenog spoja dobivenog taljenjem u jednom prolazu

Potreba za produktivnijom i kvalitetnijom izradom zavarenih konstrukcija zahtjeva primjenu visokoučinskih postupaka zavarivanja. Jedan od takvih postupaka je i MAG zavarivanje koji je pogodan za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju. MAG (eng. Metal active gas) postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina CO_2 (MAGC postupak) ili mješavini (MAGM postupak). MAG postupak zavarivanja primjenjuje se od 1953. godine u bivšem SSSR – u, prema HR EN ISO4063 oznaka mu je 135. Primjenjuje se za zavarivanje nelegiranih, niskolegiranih čelika, a pod određenim uvjetima i za visokolegirane čelike. To je produktivan postupak zavarivanja, najčešće korišten u industriji, te je univerzalan, koji omogućava zavarivanje različitih tankih i debelih materijala. Svakim danom postavljaju se sve veći zahtjevi u pogledu produktivnosti,

energetske iskoristivosti, što manjeg unosa topline i kvalitete zavarene konstrukcije. Taj napredak donio je modificirane postupke MAG zavarivanja, koji zbog svojih svojstava zauzimaju sve veću primjenu i predstavljaju neizostavan dio u strojnom parku poduzeća koje ima viziju i u koraku je s razvojem tehnologije. Zbog sve većih zahtjeva za povećanjem produktivnosti i kvalitete, treba težiti modernizaciji. Prije nabave, zbog skupe i sofisticirane opreme potrebno je odrediti područje primjene gdje će se rad sa takovom opremom isplatiti.

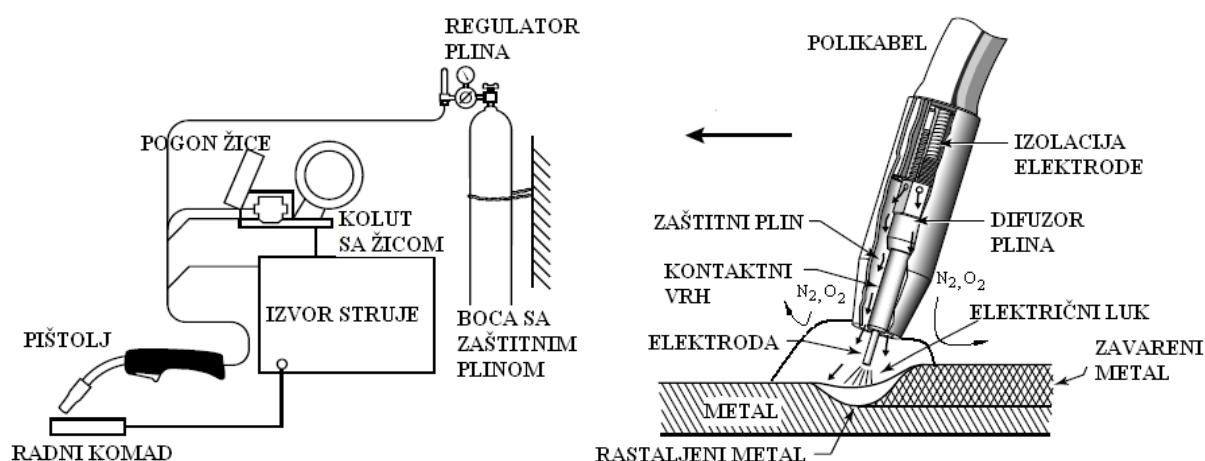
U ovom radu analizirat će se suvremene inačice modificiranih MAG postupaka koje su uspoređene sa konvencionalnim MAG zavarivanjem. Eksperimentalni dio će pokazati da li modificirani postupci MAG zavarivanja, a posebice RAPID ARC i POWER MODE zaslužuju pažnju i primjenu u tehnologiji zavarivanja, kao što ju predstavljaju proizvođači opreme za zavarivanje. Svim tim modificiranim postupcima glavna odlika je smanjen unos topline, manja zona utjecaja topline, smanjeno prskanje, digitalno kontroliranje struje i napona, bolja penetracija, kvalitetniji i homogeniji zavar koji su temeljeni na modificiranom prijenosu metala. Eksperimentalni dio vršen je u laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, na Lincoln Electric uređaju za zavarivanje koji je prikazan na slici 2.



Slika 2. Lincoln Electric aparat za zavarivanje

2. KONVENCIONALNO MAG ZAVARIVANJE

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak (koristi se toplina električnog luka za taljenje osnovnog i dodatnog materijala) zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (CO_2) ili njegovih mješavina (CO_2+Ar , O_2+Ar , $\text{CO}_2+\text{O}_2+\text{Ar}$). Uređaj za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne struje sa ravnom statičkom karakteristikom, polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina. Na slici 3. prikazan je shematski prikaz MAG postupka za zavarivanje (a) i proces taljenja (b).



Slika 3. Shematski prikaz MAG postupka za zavarivanje (a) i proces taljenja (b) [1]

Zaštitni plin ima ulogu zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja plinova iz atmosfere i ionizacijom osigurava vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Zaštitni plin na mjesto zavarivanja dovodi se kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice (Slika 2.1. b). Električni luk uspostavlja se između elektrodne žice (spojene na „+“ pol izvora istosmjerne struje) i osnovnog materijala. Električni luk je usmjereno kretanje elektrona kroz ionizirani prostor između dviju elektroda termoemisijom i emisijom električnog polja za kojeg ne vrijedi Ohmov zakon, te on mora biti konstantne duljine, a njegovo gibanje mora biti jednoliko da bi se ostvarila jednolika kvaliteta zavara. Taljenje dodatnog materijala i njegov prijenos u talinu praćen je pojavom sila, kao što su elektromagnetska i gravitacijska, sile od strujanja i eksplozije plinova, sile od pritiska plazme, te sila od površinske napetosti. Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk. Kod MAG postupka zavarivanja najčešće se koriste žice

promjera od 0,6 do 2,4 mm. Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Osim punih žice koriste se i praškom punjene žice, a mogu se koristiti sa ili bez plinske zaštite (same sebi stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre). Pune žice dobivaju se hladnim vučenjem, dok se punjene žice proizvode od metalne trake (debljine do 0,5 mm) koja se savija po duljini i puni bazičnim ili rutilnim praškom. Zavarivanje žicom punog presjeka moguće je u svim položajima, dok se kod praškom punjene žice zavaruje u vodoravnom i okomitom položaju. Ograničenje kod MAG postupka može biti pojava poroznosti, štrcanja i naljepljivanje uslijed neodgovarajuće tehnike rada i izbora parametara za zavarivanje. Na kvalitetu zavarenog spoja upravo ti parametri imaju velik utjecaj koji se biraju obzirom na vrstu i debljinu materijala, oblik spoja i položaj zavarivanja. Parametri MAG postupka zavarivanja su:

- Struja zavarivanja

Ovisi o debljini i vrsti materijala, položaju zavarivanja, definirana je brzinom (veća brzina→veća jakost struje) i promjerom žice (veći promjer→širi zavar), utječe na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena, dubinu protaljivanja, oblik zavora, te na količinu unesene topline.

- Brzina zavarivanja

Potrebno ju je uskladiti sa količinom taline jer može doći do naljepljivanja uslijed prevelike brzine zavarivanja i male količine taline i obrnuto, utječe na produktivnost i bira se u zavisnosti od jačine struje i položaja zavarivanja.

- Duljina slobodnog kraja žice

U zavisnosti od jačine struje razlikuju se tri međusobno zavisna položaja slobodnog kraja žice i mlaznice za zaštitni plin: 1. slobodni kraj žice manji od odstojanja mlaznice, za struje od 50 do 150 A, 2. slobodni kraj žice jednak odstojanju mlaznice, za struje od 150 do 350 A i 3. slobodni kraj žice veći od odstojanja mlaznice, za struje iznad 350 A.

- Napon električnog luka

Ovisi od duljine luka (veći luk→veći napon→širi i nizak zavar), utječe na način prijenosa metala, te protaljivanje, širinu i izgled zavora.

- Induktivitet

Induktivitetom se regulira brzina promjene struje pri kratkim spojevima i mješovitim lukom.

- Položaj zavarivanja

Ovisno o položaju zavarivanja primjenjuju se i različiti prijenosi metala. Kod horizontalnog i vodoravnog položaja to su štrcajući i mješoviti, dok se kod svih ostalih položaja primjenjuju kratki i impulsni prijenos metala. Kod prisilnih položaja koriste se elektrodne žice manjih promjera.

- Tehnika zavarivanja

Postoje tri osnovne tehnike zavarivanja a to su: 1. Lijeva tehnika - širi zavar i manja penetracija, koristi se za tanje materijale, 2. Okomito (neutralno) širi zavar i srednja penetracija, 3. Desna tehnika - uži zavar i veća penetracija, koristi se za deblje materijale.

- Količina i vrsta zaštitnog plina

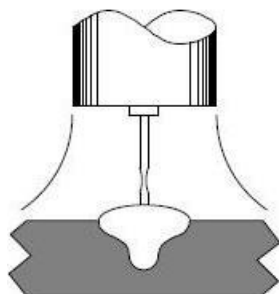
Detaljnije opisan parametar u poglavlju 2.2. Zaštitni plinovi.

2.1. Prijenos metala u električnom luku

Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom rastaljeni se metal s elektrodne žice prenosi u obliku kapljica koje se mogu prenositi slobodnim letom ili premošćivanjem. Prijenos metala odvija se u tri faze: taljenje vrha elektrodne žice i odvajanje kapljice, slobodni let kapljice kroz električni luk, te sjedinjenje kapljice sa talinom u zavarenom spoju. Velik utjecaj na način prijenosa metala u električnom luku imaju parametri struje, zaštitni plin, sastav metala i slobodna dužina elektrodne žice. Postoje četiri vrste prijenosa metala u električnom luku kod MAG postupka zavarivanja a to su: kratkim spojevima (eng. short arc, oznaka MAGk), prijelaznim lukom (eng. mixed arc, oznaka MAGi), štrcajućim lukom (eng. spray arc, oznaka MAGs) i impulsnim lukom (eng. pulsed arc, oznaka MAGp).

2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima

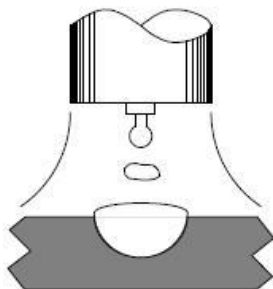
Kod prijenosa metala kratkim spojevima koriste se male struje zavarivanja (od 50 do 170 A), niske napone (od 13 do 21 V) i elektrodne žice malih promjera (od 0.6 do 1.2 mm), zaštitni plin CO_2 ili mješavine (CO_2+Ar , $\text{CO}_2+\text{Ar}+\text{O}_2$). Ovisno o promjeru žice i parametrima zavarivanja, broj ciklusa je u rasponu od 100 do 200 u jednoj sekundi. Pogodan je za spajanje tankih materijala (od 0,6 do 5 mm) zbog male količine rastaljenog metala, malenog unosa topline, malih deformacija za korjenske prolaze te u prislinim položajima. Na slici 4. prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala kratkim spojevima i izgled zavarenog spoja.



Slika 4. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [6]

2.1.2. Prijenos metala mješovitim lukom

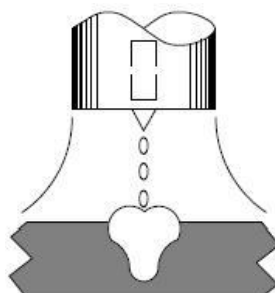
Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg luka i u manjoj mjeri dolazi do pojave kratkih spojeva. Koriste se struje (od 170 do 235 A) i naponi (od 22 do 25 V) veće su nego je slučaj kod prijenosa kratkim spojevima, što uzrokuje stvaranje većih kaplica koje se nepravilno odvajaju i padaju s vrha elektrode što ima za posljedicu pojava prskanja, nemogućnost zavarivanja u svim položajima i lošiji izgled zavora. Zaštitni plin je CO_2 zbog svoje povoljnije cijene, ali se najčešće koriste mješavine sa Ar. Na slici 5. prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom i izgled zavarenog spoja.



Slika 5. Shematski prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [6]

2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

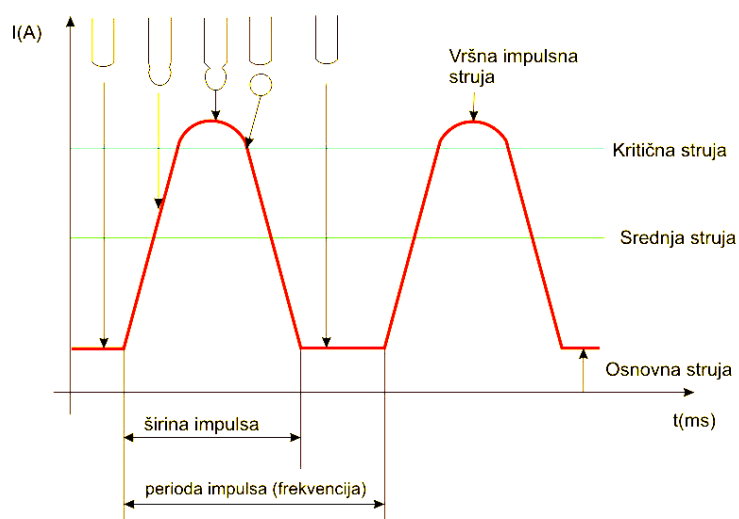
Kod prijenosa metala štrcajućim lukom karakteristično je da se metal sa vrha elektrode slobodnim letom sitih kapljica prenosi kroz atmosferu luka i pritom elektroda ne dolazi u kontakt sa osnovnim materijalom. Pogodan za zavarivanje većih debljina zbog jačih struja (od 200 do 600A) i viših napona (od 25 do 40V) i to u zaštiti sa Ar ili He jer se u zaštiti sa CO_2 dodatni materijal rasprskava, mogućnost zavarivanja u položenom i horizontalnom položaju uz velike brzine depozicije materijala, malog prskanja, velika penetracija i lijep izgled zavara.



Slika 6. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [6]

2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Kod prijenosa metala impulsnim lukom kapljica metala ostvaruje se primjenom izvora koji daje impulsnu struju frekvencije od 20 do 300 Hz. Na slici 7. prikazan je grafički prikaz impulsnog postupka i način otkidanja kapljice.



Slika 7. Grafički prikaz impulsnog postupka i način odvajanja kapljice [7]

Osnovni parametri kod ovog načina prijenosa metala su: vršna impulsna struja koja se kreće u rasponu od 250 do 650 A, osnovna struja (od 20 do 50 A), perioda impulsa (od 1 – 3 ms), frekvencija (od 20 do 300 Hz), brzina žice (od 2 do 15 m/min) koju obično postavlja zavarivač a ostale parametre podesi programska jedinica stroja. Velika odlika ovog načina prijenosa metala je mogućnost reguliranja veličine kapi u zavisnosti od frekvencije gdje se za svaki impuls odvajaju jedna kapljica, stabilan i miran električni luk. Za svaku jačinu struje, gotovo da i nema rasprskavanja, lijep izgled zavora, male deformacije te mješavine na bazi Ar i He sa maksimalno 18% CO₂.

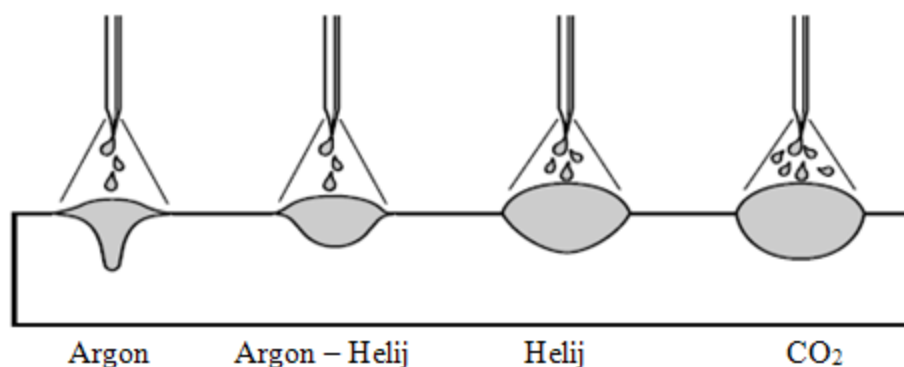
2.2. Zaštitni plinovi

Pravilan izbor odgovarajućeg plina za zavarivanje je od značajnog utjecaja što se odražava na penetraciju, širinu zavora, brzinu zavarivanja, predgrijavanje radnog komada, izgled zavora itd. Najčešće korišteni plinovi i njihova primjena za MAG zavarivanje prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Podjela zaštitnih plinova za MAG zavarivanje po HRN EN ISO14175 i njihova primjena. [4]

Grupa po HRN EN ISO14175	Oznaka	Volumni sastav (%)				
		CO ₂	O ₂	H ₂	Ar	
M1	1	> 0 do 5	-	> 0 do 5	ostatak	visokolegirani
	2	> 0 do 5	-	-	ostatak	čelici
	3	-	> 0 do 3	-	ostatak	
	4	> 0 do 5	> 0 do 3	-	ostatak	
M2	1	> 5 do 25	-	-	ostatak	nelegirani
	2	-	> 3 do 10	-	ostatak	čelici
	3	> 0 do 5	> 3 do 10	-	ostatak	
	4	> 5 do 25	> 0 do 8	-	ostatak	
M3	1	> 25 do 50	-	-	ostatak	
	2	-	> 10 do 15	-	ostatak	
	3	> 5 do 50	> 8 do 15	-	ostatak	
C	1	100	-	-	ostatak	

Kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnih plinova dolazi do reakcije između CO_2 i rastaljenog metala zbog toga treba obratiti dodatnu pažnju radi pojave oksidacije. CO_2 je inertan pri nižim temperaturama, ali se iznad 1600°C disocira u ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji tada reagira s rastaljenim metalom. Štetno stvaranje oksida pri zavarivanju može se otkloniti legiranjem elektrodne žice dezoksidantima (Si , Mn). Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na: električno fizikalna svojstva električnog luka (oblik jezgre, geometrija električnog luka, potrebna energija za ionizaciju plinova), metalurške procese u talini zavora (oksidirajuće, reducirajuće, neutralne), tehnološke parametre (dubina penetracije, širina zavora). Na slici 8. prikazan je utjecaj različitih plinova na izgled i dubinu penetracije.



Slika 8. Utjecaj različitih plinova na oblik i penetraciju zavora [1]

Što se tiče količine zaštitnog plina ona ovisi o jakosti struje zavarivanja, promjeru žice ($\Phi 0,8 \rightarrow$ od 6 do 8 l/min, $\Phi 1,6 \rightarrow$ od 14 do 16 l/min) obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Povećana potrošnja zaštitnog plina javlja se na otvorenom prostoru i pri zavarivanju kutnih spojeva sa vanjske strane. U slučaju premale količine zaštitnog plina može doći do pojave poroznosti. **Argon;** Ne dolazi do reakcija rastaljenog metala s plinom, štiti korijen zavora od oksidacije, zahtijeva točniju pripremu spoja i vođenje pištolja, osigurava duboku penetraciju. **Helij;** Kao i kod argona ne dolazi do reakcija rastaljenog metala s plinom, zbog svoje male gustoće od 0.1786 kg/m^3 potreban je veći protok, pogodan za zavarivanje u nadglavnom položaju. **Ugljični dioksid;** Jače oksidirajući plin, dolazi do reakcije rastaljenog metala i CO_2 . Penetracija je šira mogu se pokriti netočnosti pripreme spoja i vođenje pištolja, ali dolazi do štrcanja. **Kisik;** Iako je sam po sebi štetan za mehanička svojstva zavarenog spoja, dodaje se argonu i ugljičnom dioksidu jer osigurava dobar prijenos metala u sitnim kapljicama, smanjuje nadvišenje i poboljšava penetraciju.

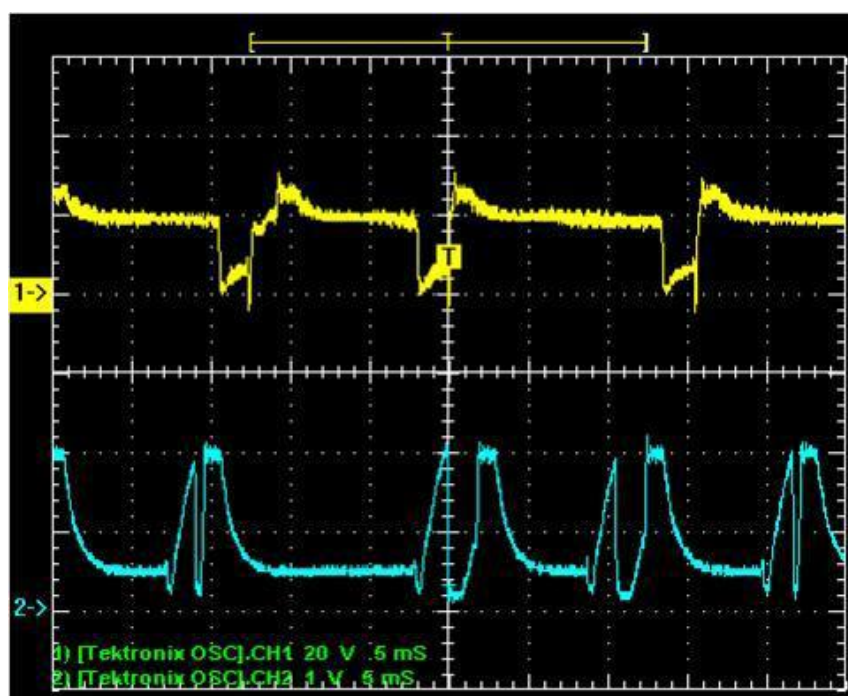
3. MODIFICIRANI MAG POSTUPCI ZAVARIVANJA

U ovom poglavlju prikazano je nekoliko modificiranih postupaka kod MAG zavarivanja koji su uspoređeni sa konvencionalnim MAG zavarivanjem, a to su STT, RMT, FastROOT, Rapid Arc i Power Mode postupak, navedeni su primjeri primjene i definirani su glavni mehanizmi prijenosa metala u električnom luku. Razvoj modificiranih postupaka kod MAG zavarivanja najviše ovisi o unapređenju izvora struje za zavarivanje koji omogućuju vrlo precizno i detaljno upravljanje prijenosom metala u električnom luku, kontroliran unos topline, korozivsku postojanost zavarenog spoja, smanjenje prskanja, manje deformacije, zavarivanje širokog spektra materijala, uz pravilan odabir parametara osiguravaju kvalitetu zavarenog spoja, veću produktivnost uz optimalne troškove, ali zbog svoje visoke cijene potrebna je detaljna analiza i izrada plana proizvodnje koji možda pri nekim zahtjevima ne će dati bolja svojstva zavarenih spojeva obzirom na konvencionalne uređaje.

Suvremeni postupci MAG zavarivanja odlikuju se modificiranim načinom prijenosa metala kod kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk ili impulsna struja. To se postiže kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja (tzv. waveform control), indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istome radnom ciklusu, primjenom balansa polariteta i uvođenjem izmjenične struje te uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanja kapljice koja kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnog materijala. Zahvaljujući razvoju uređaja danas su moguće integracije dvije impulsne razine u istom procesu. Važno je naglasiti da se proces nadzire u svakom trenutku diskretizacijom vrijednosti, tj. primjenom digitalne tehnologije. Suvremeni postupci MAG zavarivanja primjenjuju sve nabrojane mehanizme kako bi se olakšalo zavarivanje tankih materijala, smanjio unos topline i deformacije, omogućilo lakše zavarivanje korijenskog prolaza, raznorodnih materijala te povećanih razmaka između limova. MAG postupak s modificiranim prijenosom metala u području kratkog luka postižu odlične rezultate kod zavarivanja cinka primjenom dodatnog materijala s niskom temperaturom tališta na bazi legure Cu, npr. CuSi ili CuAl, jer ne dolazi do uništavanja cinčanog sloja, a kako se većinom radi o tankim materijalima, nema deformacija. Međutim, osim tih prednosti, koje u biti predstavljaju zavarivanje u području razine parametara kratkih spojeva, razvijeni su i sustavi modificiranog štrcajućeg luka koji se odlikuju znatno poboljšanom penetracijom. [9]

3.1. STT – Surface Tension Transfer

STT postupak zavarivanja nastao je u tvrtki Lincoln Electric. Izvor stuje nema ni ravnu ni padajuću karakteristiku nego se proces odvija ciklički, a promjene vrijednosti struje su izuzetno brze, te ovise o naponu. Na slici 9. prikazana je dinamička značajka STT postupka.

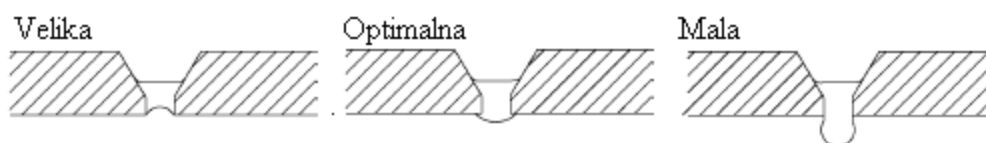


Slika 9. Dinamička značajka $1-U=f(t)$; $2-I=f(t)$ STT postupka [9]

Kod STT postupka da se podesiti više parametara nego kod konvencionalnog MAG zavarivanja, a neke od njih su:

- Pozadinska struja (označeno na slici 12. sa 1)

Osigurava unos topline u zavareni spoj, utječe se na geometriju zavora, dubinu protaljivanja, veličinu rastaljene kapljice. Na slici 10. prikazan je izgled zavora ovisno o jakosti pozadinske stuje.



Slika 10. Izgled zavora ovisno o jakosti pozadinske stuje [10]

- Vršna struja (označeno na slici 12. sa 2)

Kontrolira duljinu električnog luka, ovisno o duljini luka takav je i oblik zavora kao što je prikazano na slici 11, poboljšava vezivanje, fuziju sa sjenkama osnovnog materijala.



Slika 11. Izgled zavora ovisno o duljini električnog luka [11]

- Tailout (označeno na slici 12. sa 3)

Osigurava dodatni unos topline, a da pri tome kapljice ne postanu prevelike, veću brzinu zavarivanja

- Vrući start

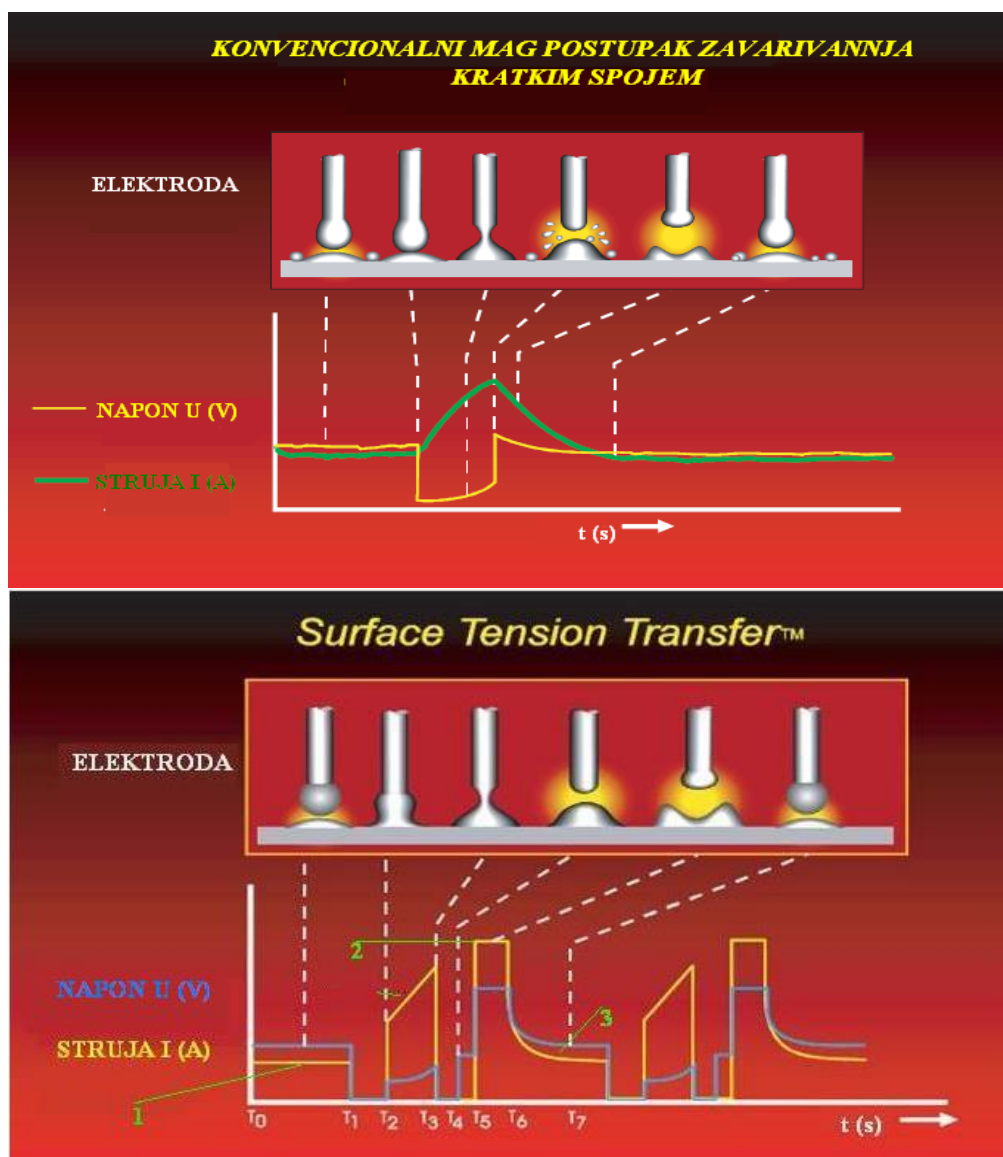
Povećava unos topline prilikom uspostave električnog luka kako bi se spriječila pojava naljepljivanja.

- Brzina žice

Utječe na količinu rastaljenog dodatnog materijala.

3.1.1. *Prijenos metala kod STT postupka zavarivanja*

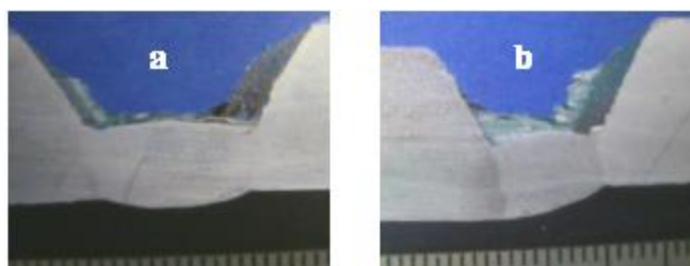
Postupak STT za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog materijala samo uz djelovanje površinske napetosti. Upravo ta kontrola sprječava porast struje koji uzrokuje rasprskavanje kapljice metala te istodobno povećava utjecaj površinske napetosti. Međutim, nakon tog odvajanja slijedi strujni impuls koji priprema i zagrijava vrh žice za novi ciklus odvajanja kapljice. Završna struja tog impulsa, tj. njezin nagib, bitno utječe na unos topline te se kao parametar posebno regulira. Rezultat je vrlo nizak unos energije uz uklanjanje štrcanja. [9] Na slici 12. prikazan je slijed odvajanja kapljice za konvencionalni MAG i za STT postupak zavarivanja.



Slika 12. Prikaz odvajanja kapljice kod CV MAG i STT postupka zavarivanja [10]

3.1.2. Područje primjene STT postupka

Glavna primjena postupaka STT je za zavarivanje korijenskog prolaza jer kvalitetno odvajanje kapljice bez prskanja, uz mali unos topline, olakšava rad. Usto, primjena MAG postupaka, tj. pune žice kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće, umanjuje rizik od nastanka hladnih pukotina zbog vrlo niske količine difundiranog vodika i uklanja potrebu zavarivanja tzv. „vrući“ prolaz“ kod izgradnje cjevovoda. Još je jedna značajka koja predstavlja mogućnost zavarivanja pripreme s većim smaknućem i razmakom, slika 13. Zbog malog unosa topline postupak je pogodan za zavarivanje tankih materijala, i to nelegiranoga i visokolegiranog čelika, legure nikla. [9]



Slika 13. Provar korijena STT postupkom kod: a) većeg razmaka i b) smaknuća [9]

3.1.3. Usporedba postupka STT i konvencionalnog MAG zavarivanja

U tablici 2. data je usporedba STT postupka i konvencionalnog MAG zavarivanja kod polaganja korijenskog zava. Usporedba je izvršena na cijevima Ø273 mm, debljine stijenke 10 mm sa tehnikom rada odzgo prema dole sa okretanjem cijevi (1G-PA), a provodila se u brodogradilištu 3. MAJ u Rijeci. Izvršene su tri probe STT postupkom i jedna proba konvencionalnim MAG zavarivanjem.

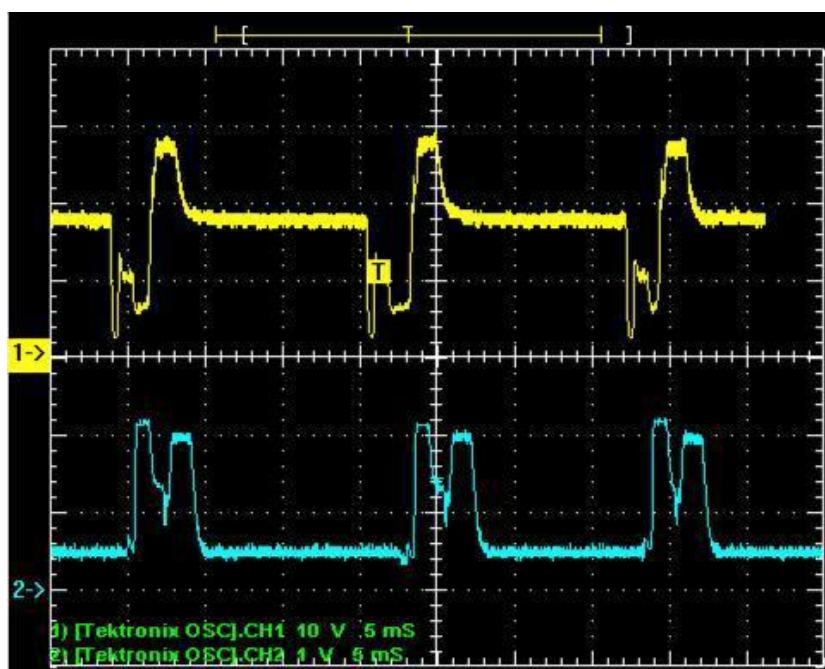
Tablica 2. Usporedba STT postupka i konvencionalnog MAG postupka kod polaganja korijenskog zava. [13]

Oznaka, postupak, zračnost	Brzina žice [m/min]	Vrijeme zavarivanja [min]	Srednja jakost struje [A]	Vršna struja [A]	Pozadinska struja [A]	Napon [V]	Unos topline [kJ/mm]
Proba 1 STT 3-3,5	3,6	5,22	100,3	275	75	16,9	0,533
Proba 2 STT 3-3,5	3,6	6,05	96,8	275	75	15,6	0,55
Proba 3 STT 4-4,5	5,2	4,5	145	400	77	15	0,6
Proba 4 MAG 4-4,5	4,5	7,33	115	-	-	17,5	0,89

Rezultati nakon ispitivanja pokazali su da je zavarivanje korijenskog zavara STT postupkom prihvatljiv u pogledu veće brzine izvođenja korijenskog zavara, manji unos topline, manjeg prskanja, manjeg trošenja potrošnih dijelova te zaštite opreme zavarivača. [13]

3.2. FastROOT

FastROOT postupak zavarivanja nastao je u tvrtki Kemmpi. Osnovni koncept postupaka FastROOT zasniva se na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima, što rezultira niskim unosom energije. Pri zavarivanju ovim postupkom napon i stuja zavarivanja su digitalno kontrolirani. Na slici 14. prikazana je dinamička značajka FastROOT postupka.

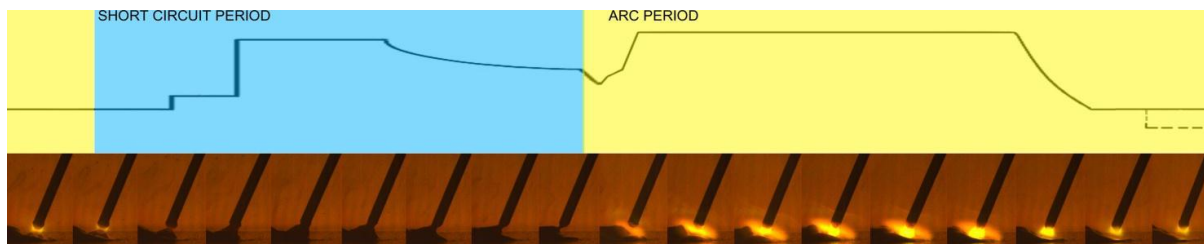


Slika 14. Dinamička značajka $1-U=f(t)$; $2-I=f(t)$ postupka FastROOT [9]

3.2.1. Prijenos metala kod FastROOT postupka

Obrazac kombinacije struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa za zagrijavanje javlja se i u ovom slučaju. Naime, nakon prvog stanja kratkog spoja, u kojem dolazi do odvajanja kapljice, aktivira se drugi strujni interval koji zagrijava osnovni materijal i vrh žice te ga priprema za novi ciklus. Ovim sekundarnim strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline koja utječe na oblikovanje zavarenog spoja. Nakon toga održava se osnovna struja koja osigurava energijsko stabilno stanje električnog luka i taline do sljedećega kratkoga spoja. Da bi se ostvarilo ovako sofisticirani prijenos metala u električnog luku potrebna je

izrazito brza regulacija jačine struje i napona u svakom trenutku odvajanja kapljice, što rezultira prijenosom metala bez štrcanja. [9] Oblik krivulje jakosti struje za jedan ciklus kod FastROOT postupka zavarivanja prikazana je na slici 15. dok slika 16. prikazuje slijed odvajanja kapljice u električnom luku.



Slika 15. Oblik krivulje jakosti struje FastROOT postupka za jedan ciklus [14]



Slika 16. Slijed odvajanja kapljice kod FastROOT postupka [9]

3.2.2. Područje primjene FastROOT postupka

Glavna primjena FastROOT postupka je zavarivanje korijenskog prolaza gdje se regulacijom parametara sekundarnog strujnog pulsa može precizno utjecati na oblik provara, slika 17. Brzo zavarivanje korijenskog prolaza, čak i u uvjetima većeg razmaka i smaknuća bez štrcanja u PG položaju, značajka je ovog postupka koji je vrlo često primjenjen u praksi. [9]



Slika 17. Utjecaj sekundarnog strujnog pulsa na oblik provara kod postupka FastROOT [14]

Osim za korijenski prolaz, FastROOT je zbog niskog unosa energije pogodan za zavarivanje tankih i ultra tankih limova od 0,3 mm pa na dalje (nelegirani i visokolegirani čelik, nikal legure) poglavito u situacijama većeg razmaka između komada, slika 18. [9]



Slika 18. Razmak između materijala „V“ spoja 3 mm i izgled zavora kod postupka FastROOT [14]





3.2.3. Usporedba postupka FastROOT i konvencionalnog MAG zavarivanja

Napravljena je usporedba konvencionalnog MAG i FastROOT postupka zavarivanja. U tablici 3. dat je prikaz parametara koji su se koristili kod određenog postupka, prikazani su uzorci dobiveni određenom metodom zavarivanja sa i bez zračnosti između materijala.

Tablica 3. Prikaz parametara kod usporedbe konvencionalnog MAG i FastROOT postupka [15]

	CV MAG	FastROOT
Vrsta materijala	Konstrukcijski čelik	
Debljina materijala	1,5 mm	
Vrsta spoja	Kutni spoj	
Promjer žice	1 mm	
Tehnika rada	Odozgo prema dolje	
Broj prolaza	1	
Protok plina	15 l/min	
Vrsta plina	Ar + 8% CO ₂	
Zračnost	0 mm	
Duljina sl. dijela žice	6 mm	13 mm
Kut nagiba pištolja	90°	97°
Brzina zavarivanja	13 mm/s	
Brzina žice	3,2 m/min	3,5 m/min
Napon	15 V	
Struja	100 A	95 A

Nastavak tablice 3.

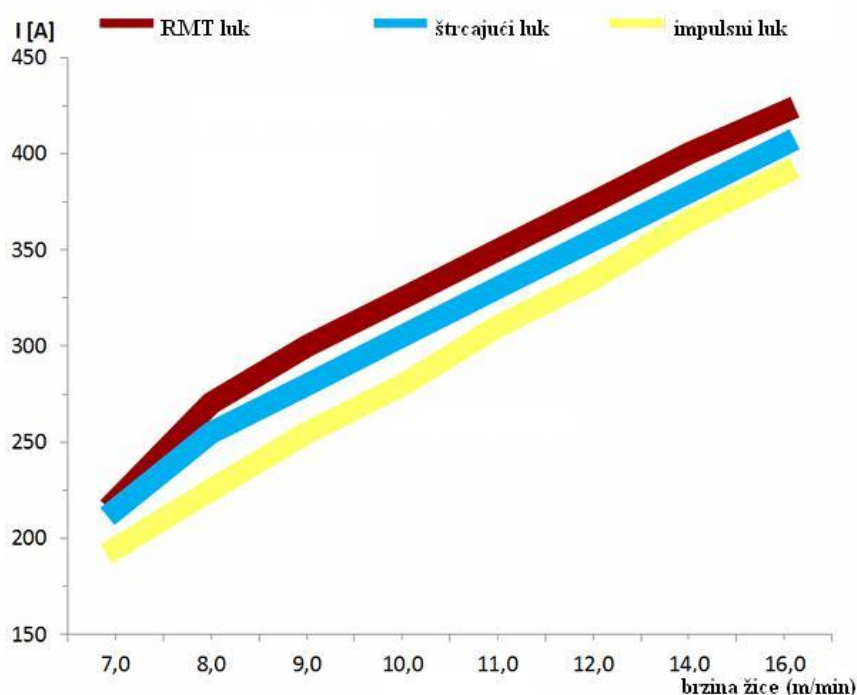
	MAG	FastROOT
Izgled zavora		
Zračnost (pri dnu)	0,7 mm	1,2 mm
Duljina sl. dijela žice	6 mm	13 mm
Kut nagiba pištolja	90°	97°
Brzina žice	3,2 m/min	3,7 m/min
Brzina zavarivanja	13 mm/s	
Napon	15 V	16,5 V
Struja	105 A	98 A
Izgled zavora		

Nakon izvršenih ispitivanja došlo se je do sljedećih zaključaka:

- FastROOT postupak ima oko 25% manji unos topline naspram CV MAG, a time manje utječe na strukturu materijala.
- Bolja kontrola prijenosa dodatnog materijala.
- Zavarivanje zavora većih od 1 mm sa brzinama od 20 mm/s, što kod CV MAG postupka nije slučaj jer već kod zavora od 0,7 mm i brzinama zavarivanja od 14 mm/sec pokazuje loše rezultate.
- Bolji, kvalitetniji izgled zavora bez rasprskavanja.
- Manje deformacije.
- Sofisticiran uređaj visoke cijene.

3.3. RMT - Rapid MAG Technology

RMT postupak zavarivanja razvijen je u tvrtki ESS Schweißtechnik, a temelji se na koncentriranom štrcajućem prijenosu dodatnog materijala. Kod RMT postupka električni luk daje i do 10% više energije za istu brzinu dodavanja žice nego što je to slučaj sa konvencionalnim MAG postupkom. Na slici 19. data je usporedba jačine struje u ovisnosti od brzine žice za RMT luk, štrcajući i impulsni luk.



Slika 19. Jakost struje u ovisnosti o brzini žice [16]

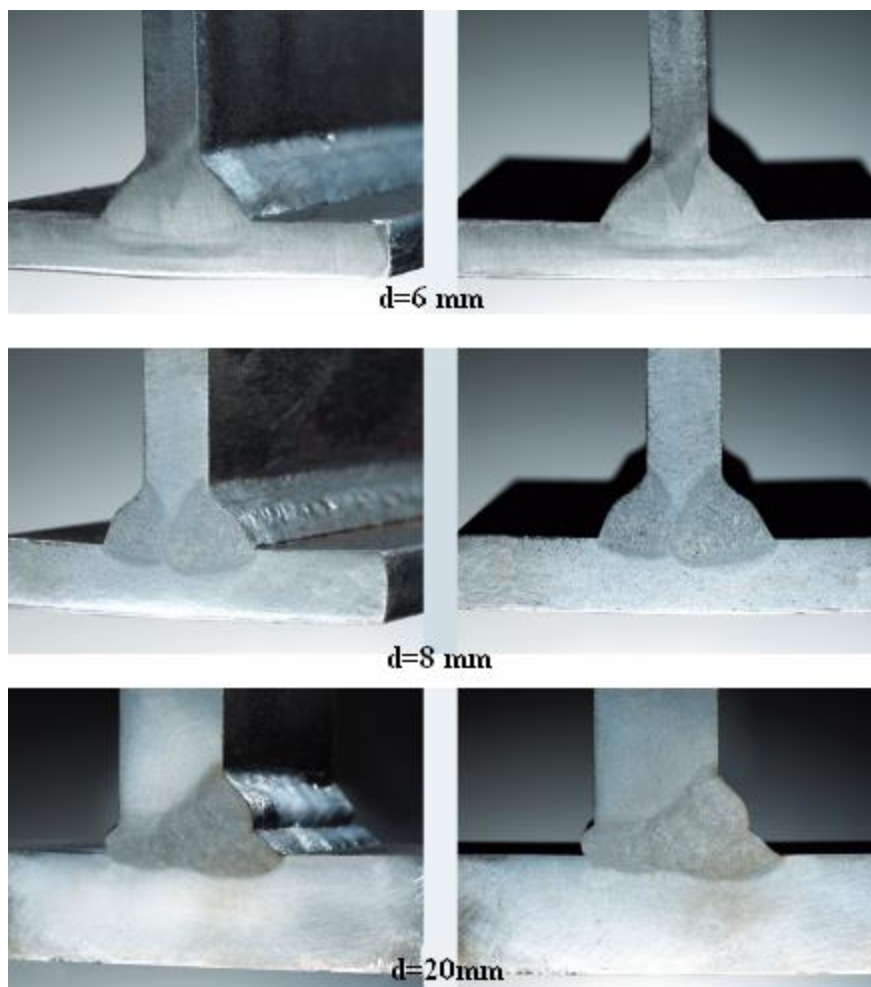
3.3.1. Prijenos metala kod RMT postupka

Kod konvencionalnoga štrcajućeg luka prijenos metala se ostvaruje u neprekidnom nizu kapljica malog promjera. Prijelazna struja, kod koje dolazi do stabilnoga štrcajućeg luka, ovisi o vrsti i promjeru žice te zaštitnom plinu. Optimalan prijenos štrcajućim lukom postiže se u mješavinama bogatim argonom, a prijelazna struja pada kako udio argona raste.

Kod postupaka RMT MAG prijenos materijala zbiva se u vrlo sitnim kapljicama, pri čemu je frekvencija prijenosa oko 2-3 kHz. Tim mehanizmom još se sužava jezgra luka, snižava napon i visina luka u odnosu na klasični štrcajući luk, što rezultira većom koncentracijom energije i znatno intenzivnijom penetracijom. [9]

3.3.2. Područje primjene RMT postupka

Zbog karakteristike povećanog unosa koncentrirane topline i odlične penetracije postupak RMT pogodan je za zavarivanje debljih materijala, a kutni zavareni spojevi do 8 mm mogu se zavarivati bez pripreme spoja. Na slici 20. prikazani su kutni spojevi različitih debljina zavareni RMT postupkom.



Slika 20. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom (materijal: čelični lim) [16]

Primjenom RMT postupka kod većih debljina postoji mogućnost smanjenja kuta pripreme sa 45° na 30° čime se smanjuje broj prolaza. Primjena postupka RMT rezultira boljim spojem, manjim defamacijama materijala, većom brzinom zavarivanja, smanjeno je vrijeme pripreme spoja, pojava štrcanja i unos topline je niži.

3.4. Rapid Arc

Rapid Arc postupak zavarivanja razvijen je u tvrtki Lincoln Electric. Prijenos metala odvija se modificiranim načinom kombinacijom impulsa i kratkog električnog luka. Namijenjen je za veće brzine zavarivanja u cilju povećanja produktivnosti u polu-automatskom, automatskom ili robotskom načinu rada. Osim što ga odlikuje velika brzina zavarivanja koja može biti i nevjerovatnih 2,54 m/min za debljine materijala od 1,5 do 4 mm, sposoban je također zavarivati i materijale debljine do 12,7 mm, a odlikuje ga i niski unos topline što doprinosi manjoj deformaciji materijala, nižoj pojavi štrcanja u odnosu na MAGp (slika 21.), velika penetracija, zavarivanje u svim položajima, mogućnost korištenja pune ili praškom punjene elektrodne žice, zavarivanje manjim naponom u odnosu na konvencionalni MAGp postupak sa velikom stabilnošću električnog luka. [17]

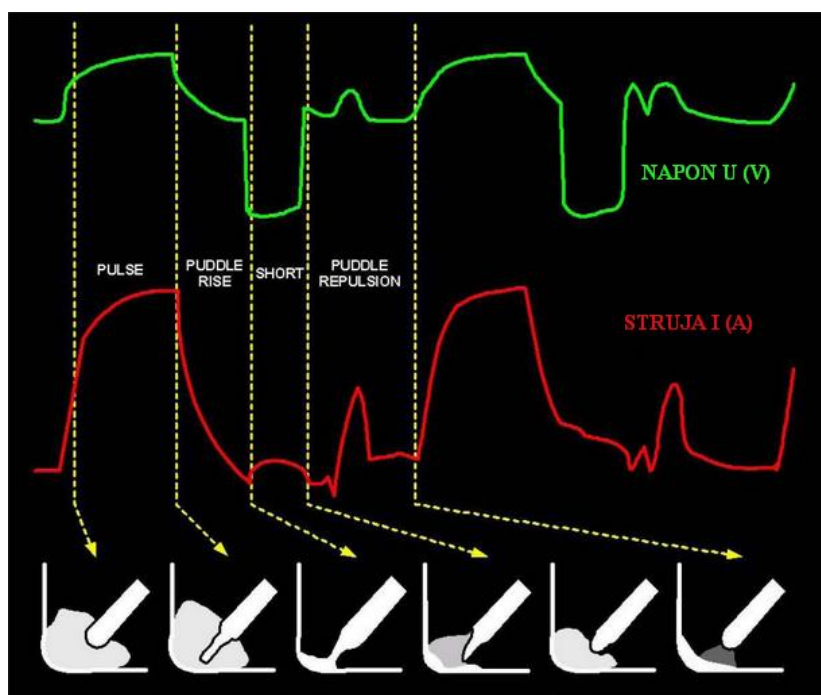


Slika 21. Usporedba pojave štrcanja kod MAGp(1) i Rapid Arc (2) postupka [17]

Rapid Arc postupak koristi tehnologiju „waveform control“ koja omogućava kontinuirano upravljanje strujom i naponom zavarivanja. Na samom uređaju postoji mogućnost biranja parametara zavarivanja a to su visina luka ili napon i brzina elektrodne žice ili struja, a sve ostalo se mijenja ovisno o početnim uvjetima. Primjenom „waveform“ tehnologije dobiva se stabilnost električnog luka, krući i širi električni luk, mirna talina i veća penetracija.

3.4.1. Prijenos metala kod postupka Rapid Arc

Prijenos dodatnog materijala kod Rapid Arc postupka vrši se na modificiran način upotrebljavajući impulsne struje i kratki električni luk pri čemu je frekvencija prijenosa od 100 do 200 Hz. Duljina električnog luka je kratka, ali široka, napon je niži, a time je i manji unos topline, prskanje je smanjeno u odnosu na MAGp postupak pomoću precizne kontrole koju omogućava postupak Rapid Arc. [17] Na slici 22. dan je prikaz prijenosa dodatnog materijala postupkom Rapid Arc a na slici 23. slijed odvajanja kapljice.



Slika 22. Prikaz prijenosa metala postupkom Rapid Arc [17]

Pulse – impuls – nagli porast struje uzrokuje povećanje energije električnog luka, što oblikuje i radi rastaljene kapljice na vrhu elektrodne žice

Puddle Rise – uspon taline – smanjenjem struje oslobađa se sila plazme koja vrši pritisak na talinu, omogućujući joj da se diže prema vrhu elektrodne žice

Short – kratki spoj – njime dolazi do nestajanja luka, te dolazi do spajanja vrha elektrodne žice i taline

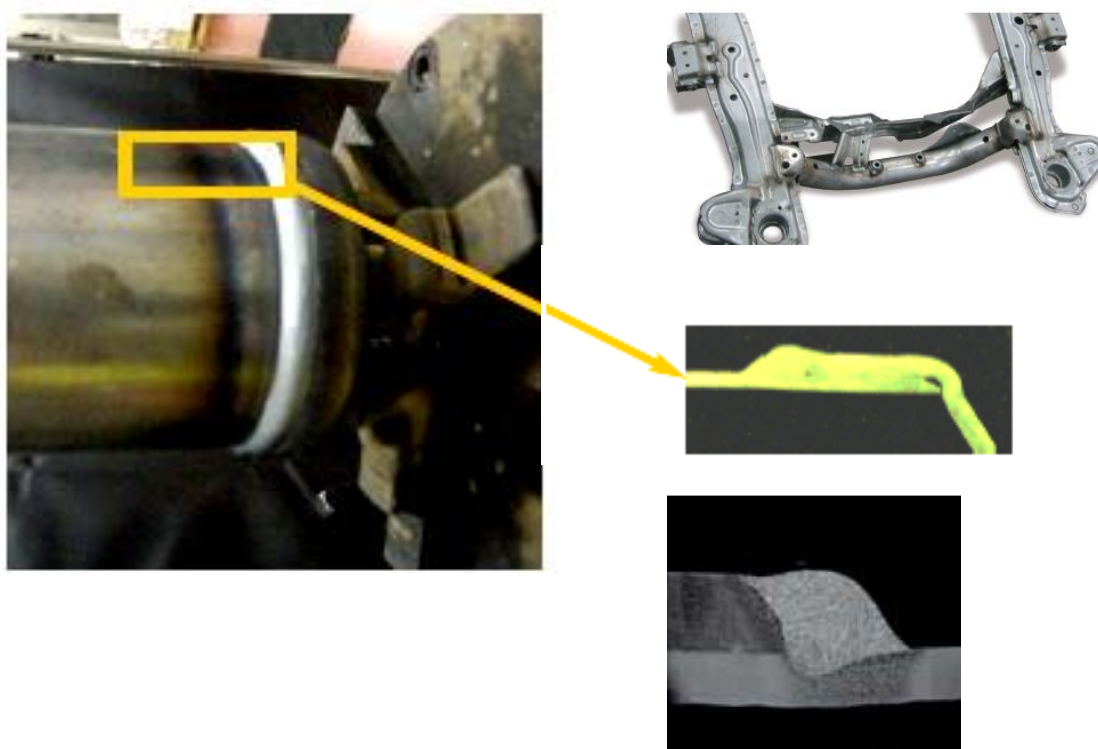
Puddle Repulsion – odvajanje taline – ubrzo nakon nestajanja luka radi kratkog spoja, nježnim pritiskom plazme se otklanja talina i ponovno se uspostavlja kontakt s vrhom elektrodne žice. Time se osigurava pouzdano odvajanje vrha elektrode žice i taline, rezultirajući sa stabilnim ritmom ciklusa.



Slika 23. Slijed odvajanja kapljice kod postupka Rapid Arc [24]

3.4.2. Područje primjene postupka Rapid Arc

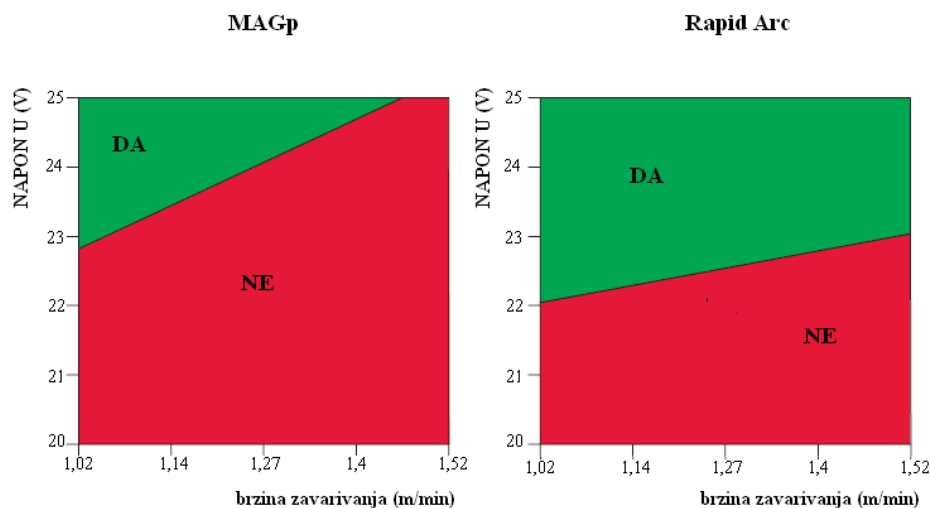
Rapid Arc postupak primjenjuje se za zavarivanje konstrukcijskih i nehrđajućih čelika, posjeduje izrazito veliku brzinu zavarivanja, zadržavajući lijep izgled zavora uz prihvatljivo štrcanje. Ima sposobnost za optimizaciju procesa kako bi se omogućile velike brzine zavarivanja koje pogoduju povećanju produktivnosti i robotiziranom načinu rada. Na slici 24. prikazani su primjeri primjene Rapid Arc postupka i izgled zavora. [17]



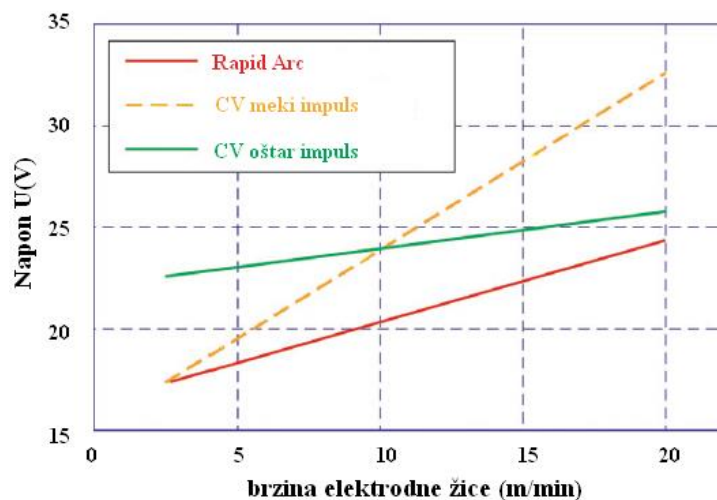
Slika 24. Primjeri primjene postupka Rapid Arc i izgled zavora[17]

3.4.3. Usporedba postupka Rapid Arc i MAGp

Usporedba između MAGp i Rapid Arc postupka u pogledu napona i brzine zavarivanja prikazana je na slici 25., a slika 26. prikazuje usporedbu brzine elektrodne žice u ovisnosti napona za Rapid Arc i konvencionalne postupke. Zelene površine predstavljaju povoljne napone za zadane brzine zavarivanja, električni luk je stabilan a štrcanje umanjeno.



Slika 25. Usporedba MAGp i Rapid Arc postupka u ovisnosti napona i brzine zavarivanja [17]

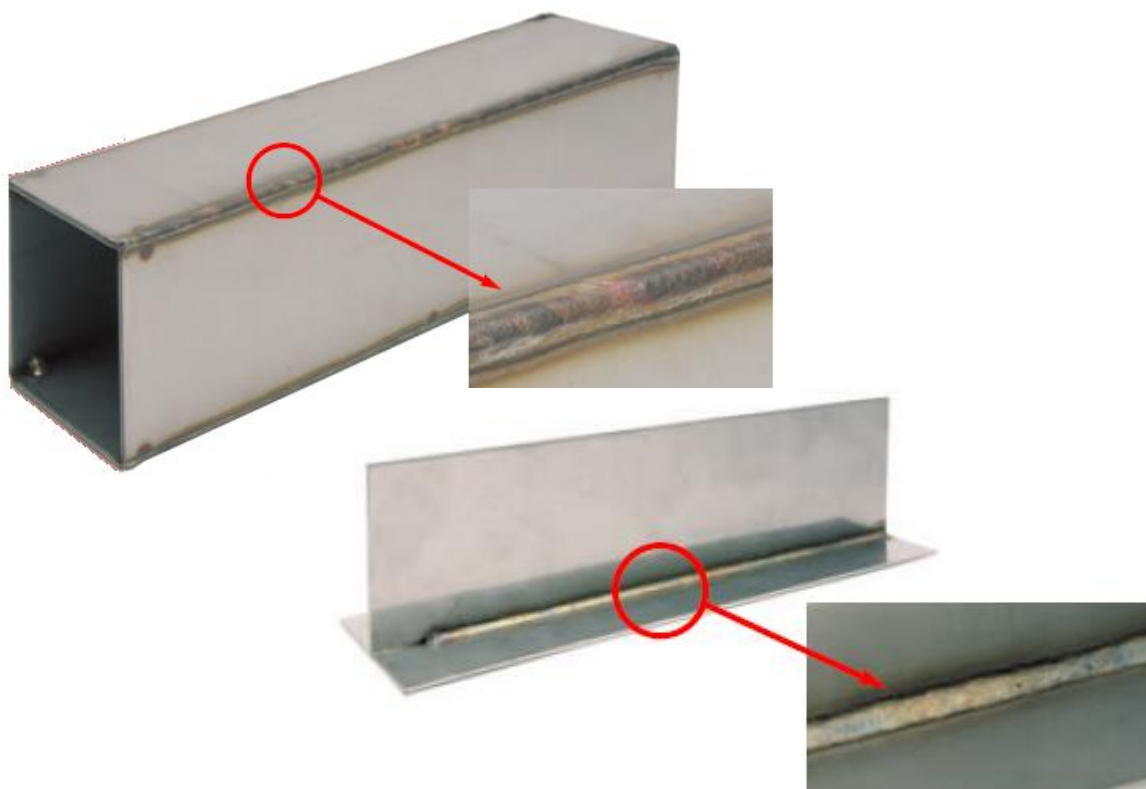


Slika 26. Ovisnost napona i brzine elektrodne žice kod CV MAG i Rapid Arc postupka [17]

U eksperimentalnom dijelu biti će prikazane usporedbe između Rapid Arc i konvencionalnog MAG postupka zavarivanja u pogledu penetracije, unosa topline, napona, struje i ostalih parametara bitnih za proces zavarivanja, te ocjena da li se isplati uvoditi tehnologiju Rapid Arc u proizvodnju.

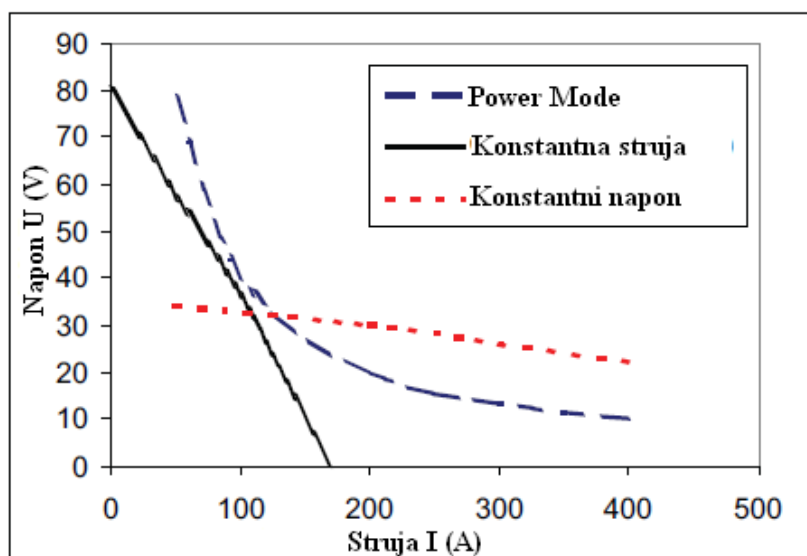
3.5. Power Mode

Kao i kod postupka Rapid Arc, Power Mode nastao je u tvrtki Lincoln Electric temeljen na tehnologiji waveform. Postupak pruža stabilan električni luk usmjerene energije uz jednoliku penetraciju duž čitavog zavora, namjenjen za materijale manjih debljina čak i ispod 0,7 mm. Mogućnost kvalitetnog izvođenja rubnog zavora i raznih spojeva bez pojave prskanja kao što je prikazano na slici 27., namjenjen za različite materijale uključujući aluminij i nehrđajuće čelike.



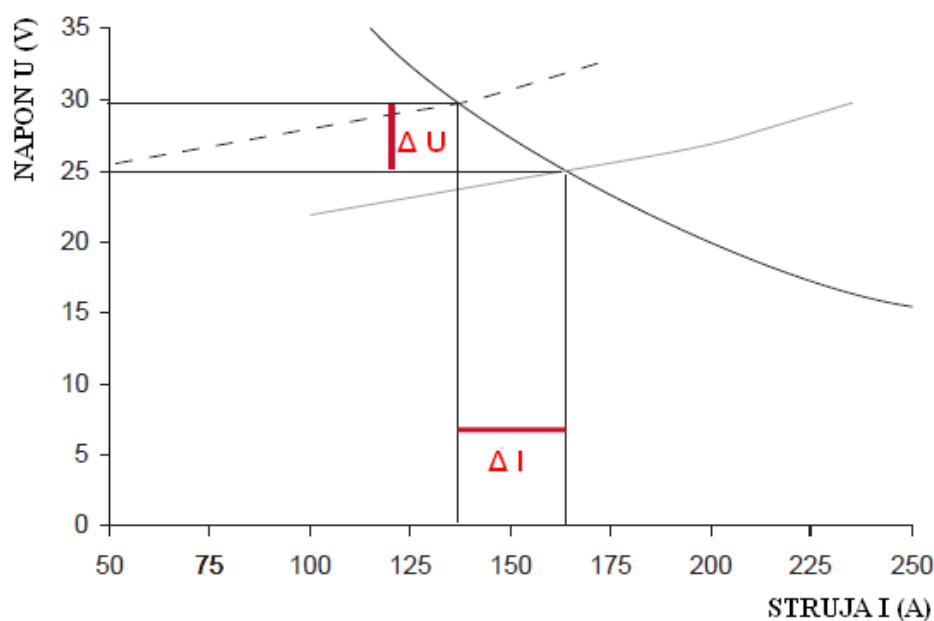
Slika 27. Kutni i zaobljeni zavareni spoj primjenom Power Mode postupka [18]

Regulacija električnog luka kod postupka Power Mode vrši se pomoću snage električne energije ($P=I \cdot U$). Prijenos dodatnog materijala ostvaruje se kratkim, mješovitim ili štrcajućim lukom ovisno o brzini elektrodne žice i snazi zadane programom. Postupak Power Mode pokazuje izvrsne rezultate kod zavarivanja materijala gdje je od izuzetne važnosti konstantna dubina protaljivanja, a on to svojom tehnologijom omogućava. Na slici 28. prikazan je odnos napona/struje pri konstantnoj stuji, naponu i snazi Power Mode postupka, gdje se pri većim strujama ponaša kao konstantni napon, a pri većim naponima kao konstantna struja.



Slika 28. Prikaz odnosa napona/struje pri konstantnoj struji, naponu i snazi Power Mode postupka [18]

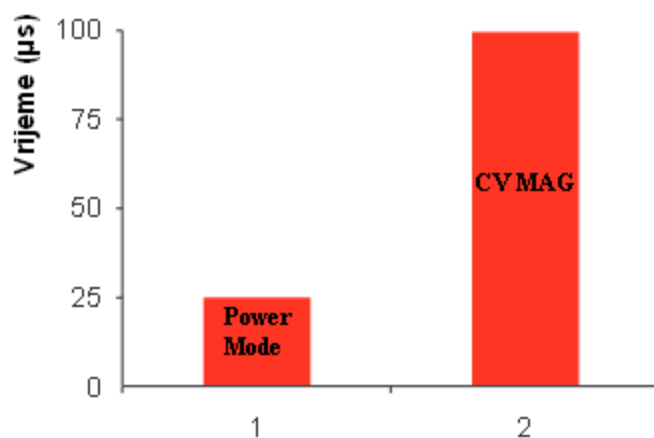
Pomoću svog modificiranog načina upravljanja procesom zavarivanja koji se temelji na konstantnoj snazi koja se održava praćenjem električnog luka, moguće je zavarivanje materijala sa konstantnom i jednoličnom penetracijom duž čitave duljine zavara. Ako u nekom trenutku prilikom zavarivanja dođe do promjene duljine električnog luka bilo povećanja ili smanjenja postupak Power Mode to detektira i vrši kompenzaciju struje i napona u cilju održavanja konstantne snage kao što je prikazano na slici 29.



Slika 29. Održavanje konstantne snage pomoću Power Mode postupka [18]

3.5.1. Usporedba postupaka Power Mode i CV MAG

Na slici 30. prikazana je ilustracija vremenskog odziva između Power Mode i CV MAG postupka u polu – automatskom načinu rada prilikom povećanja ili smanjenja električnog luka.



Slika 30. Usporedba vremenskog odziva između Power Mode i CV MAG postupka [18]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj istraživanja

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno odrediti:

- Područje primjene Rapid Arc i Power Mode postupaka obzirom na vrstu i debljinu osnovnog materijala te vrstu spoja.
- Odrediti optimalne parametre i plinske mješavine te zavariti uzorke automatski.
- Usporediti penetraciju, brzinu zavarivanja, oblik i geometriju zavaraka kao i operative značajke sa konvencionalnim MAG postupkom.

4.2. Općenito o opremi

Eksperimentalni dio pokusa izveden je u laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na Lincoln Electric uređaju za zavarivanje, slika 31.



Slika 31. Lincoln Electric uređaj za zavarivanje (1. Izvor struje s dodacima, 2. Kontrolni panel, 3. Elektronički modul)

4.2.1. Power Wave S350CE

Power Wave S350CE je robustan i napredan uređaj za zavarivanje koji može zavarivati širok spektar materijala (konstrukcijski čelik, nehrđajući čelik, aluminij, bakar, nikal i njihove legure), mogućnost zavarivanja sa punom ili praškom punjenom elektrodnom žicom. Sadrži preko 60 načina rada među kojima su i postupci STT (za korijensko zavarivanje), Rapid Arc

(za velike brzine zavarivanja i mali unos topline), Power Mode (kratak luk koji je odličan za zavarivanje tanjih materijala), CV MAG i drugi. Opremljen je mrežnim sučeljem te nudi mogućnost preuzimanja novijih verzija poboljšanja i dopune modova (powerwavesoftware.com). Nudi mogućnost pohranjivanja zavarivačkih procedura te zaključavanje vlastito podešenih postavki. Mogućnost podešavanja duljine električnog luka i mijenjanje karakteristika električnog luka. Tokom rada moguće je prebacivati se iz jednog u drugi postupak zavarivanja. Uređaj je kompatibilan sa LF 45 (dodavač elektrodne žice i sa sustavom hlađenja Cold Arc 50 (upotrebljava se za vodeno hlađenje). Na slici 32. prikazan je model S350CE, a u tablici 4. dati su tehnički podaci o izvoru. [21]



Slika 32. Uređaj za zavarivanja Power Wave S350CE [21]

Tablica 4. Tehnički podaci za Power Wave S350CE [21]

Naziv	Šifra	Interminencija	Radna temperatura	V x Š x L (mm)
PW S350CE	K2823-2	350A/31,5V/40%	-20 do + 40°C	570 x 356 x 630
Težina (kg)	Osigurač	Opseg struje	Iskoristivost	Ulaz
46,6	40/25A	5-350A	95%	230/400V3Ph 50/60Hz

Uređaj koristi struju 300 A i napon 29 V pri 100% radnom ciklusu, 350 A i 31,5 V pri 40% radnom ciklusu. Radni ciklus (interminencija) temeljen je na vremenskom periodu od 10 minuta (pri 40% radnog ciklusa, zavarivanje se provodi 4 minute). [21]

4.2.2. LF 45

Line Feed 45 dizajniran za rad sa Lincoln digitalnim strujnim izvorima, dodavač elektrodne žice LF 45 prikazan je na slici 32.



Slika 33. LF 45 dodavač elektrodne žice [22]

To je malen i jednostavan uređaj sa četiri kotačića u dodavaču sa snažnim motorom koji posjeduje Arclink kontrolu kako bi mogao raditi na svim Power Wave i Speedtec uređajima za zavarivanje. Dodavač žice LF 45 ima mogućnost biranja programa zavarivanja, kontrolu brzine dodavanja elektrodne žice i kontrolu dužine električnog luka. Na LF 45 postoji mogućnost biranja visine luka ili napona i brzine elektrodne žice ili struje, sve ostalo se mijenja ovisno o početnim uvjetima. Opremljen je funkcijama vrućeg i mekog starta, podesiti se može koliko mu treba vremena prije nego počne zavarivati, koliko vremena poslije zavarivanja ide zaštitni plin, ima mogućnost daljinskog odabira parametara na samom pištolju za zavarivanja, može zavarivati i poslije kada se otpusti prekidač na pištolju. U tablici 5. prikazani su tehnički podaci o LF 45.

Tablica 5. Tehnički podaci za LF 45 [22]

Naziv	Šifra	Hlađenje	Ulaz	Brzina dodavanja žice (m/min)
LF – 45	K14072-1	A/V	40 V DC	2 – 20
V x Š x L (mm)	Broj valjaka	Težina (kg)	Promjer žice (mm)	
440 x 270 x 636	4	17	0,8 - 1,6 (punjena), 1,0 - 1,6 (puna)	

4.3. Usporedba između CV MAG i modificiranih Rapid Arc i Power Mode postupka u pogledu unosa topline

Postupak zavarivanja za sva tri postupka provodio se automatskim vođenjem pištolja u PB položaju, zavarivao se T spoj, samo sa jedne strane. Materijal je konstrukcijski čelik (S 355) debljine 8 mm na kojem se radila usporedba između CV MAG i Rapid Arc postupka i debljina od 3 mm na kojem se radila usporedba između CV MAG i Power Mode postupka. Njihovi parametri prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Prikaz ulaznih parametara kod CV MAG, Rapid Arc i Power Mode postupka

Materijal -	Promjer žice (mm)	Zaštitni plin %
S355	1,2	82Ar+18CO ₂
Debljina materijala (mm)	Tehnika rada -	Protok zaštitnog plina (l/min)
3 i 8	Neutral	18

4.3.1. Usporedba unosa topline između CV MAG i Rapid Arc postupka

Postupak Rapid Arc namijenjen je za zavarivanje materijala debljine od 1,5 do 4 mm gdje postiže velike brzine zavarivanja i odlične rezultate u pogledu produktivnosti, ali je sposoban također zavarivati i materijale debljine do 12,7 mm. Napravljena su dva uzorka sa CV MAG i dva uzorka sa Rapid Arc postupkom. U tablici 7. (uzorci 1. i 2.) prikazani su ulazni parametri za svaki prolaz kod CV MAG postupka, a u tablici 8. (uzorci 3. i 4.) Rapid Arc postupkom zavarivanja i prikazan je unos topline za svaki uzorak, koji se izračunava prema sljedećoj jednadžbi:

$$Q = \frac{U \times I}{v_{zav}} \times \eta$$

gdje je:

I - jakost struje (A)

U - napon (V)

v_{zav} - brzina zavarivanja (mm/s)

η - koeficijent iskoristivosti (%)

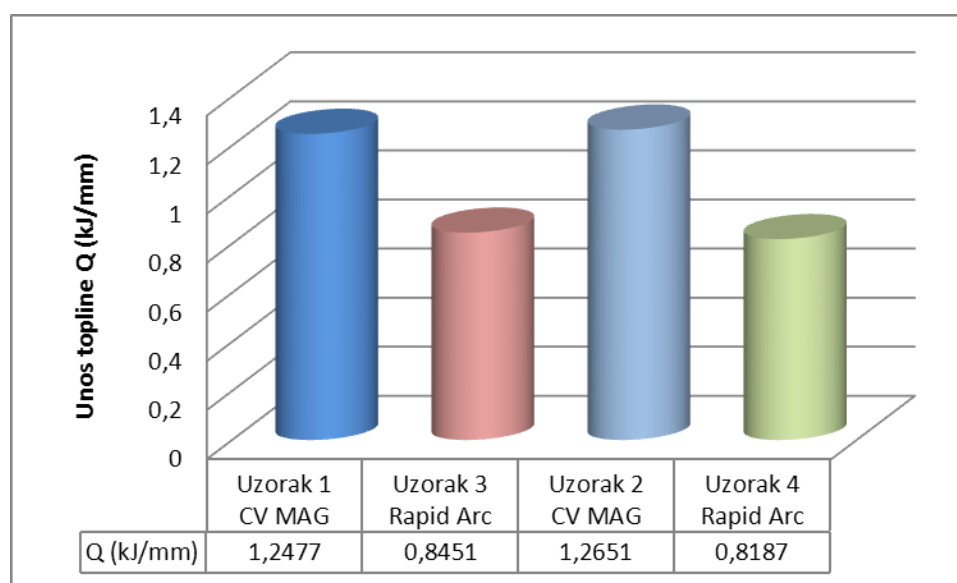
Tablica 7. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 1. i 2. primjenom CV MAG postupka (8 mm)

Uzorak 1.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
CV MAG	49	11	360
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
1,2477	33,3		
Uzorak 2.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
CV MAG	49	11	365
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
1,2651	33,3		

Tablica 8. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 3. i 4. primjenom Rapid Arc postupka (8 mm)

Uzorak 3.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
Rapid Arc	49	11	290
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0,8451	28		
Uzorak 4.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
Rapid Arc	59	13	330
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0,8187	28,7		

Rapid Arc u usporedbi sa CV MAG postupkom ima značajno manji unos topline i to preko 30% što je i prikano na slici 34. gdje se vršila usporeba između uzoraka 1. (CV MAG). i 3. (Rapid Arc) pri jednakoj brzini zavarivanja od 49 cm/min gdje je unos topline kod Rapid Arc za 32% manji u odnosu na CV MAG postupak, te uzoraka 2. (CV MAG). i 4. (Rapid Arc) pri različitoj brzini zavarivanja od 49 cm/min za CV MAG i 59 cm/min za Rapid Arc, gdje je unos topline kod postupka Rapid Arc za 35% manji u odnosu na CV MAG postupak.



Slika 34. Unos topline u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Rapid Arc) i različitoj brzini zavarivanja

Smanjen unos topline povoljno djeluje na materijal koji se zavaruje zbog manjih deformacij, naprezanja te manjeg ZUT – a.

4.3.2. Usporedba unosa topline između CV MAG i Power Mode postupka

Power Mode postupak zavarivanja namjenjen je za tanje materijale, gdje pruža izvrsne rezultate, konstantnu dubinu protaljivanja te smanjeno štrcanje. Koristi malen električni luk koji je jako pogodan kod zavarivanja tankih čeličnih limova i inoxa. Napravljena su dva uzorka sa CV MAG postupkom i četiri uzorka sa Power Mode postupkom, ulazni parametri za svaki prolaz i unos topline za svaki uzorak prikazani su u tablici 9. za CV MAG, a u tablici 10. za Power Mode postupak.

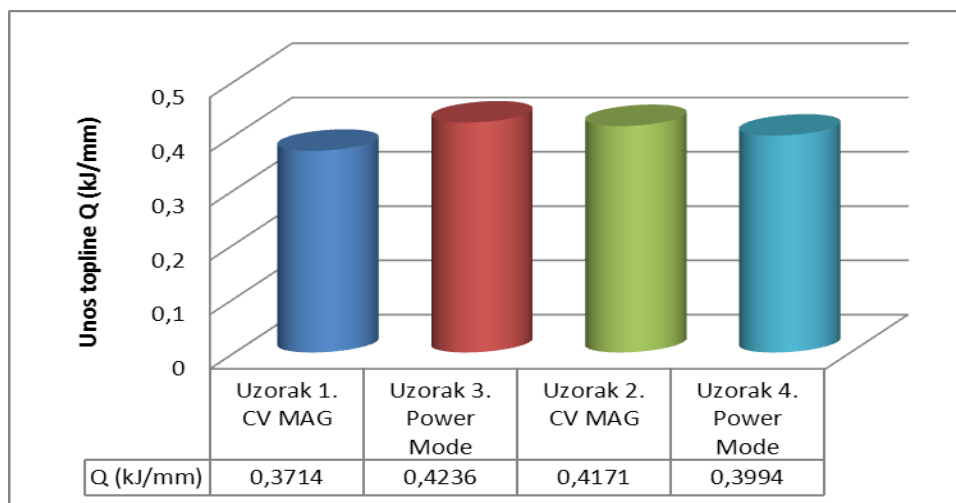
Tablica 9. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 1. i 2. primjenom CV MAG postupka (3 mm)

Uzorak 1.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
CV MAG	49	5	195
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0.3714	18,3		
Uzorak 2.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
CV MAG	59	6,5	230
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0,4171	21		

Tablica 10. Prikaz ulaznih parametara i unos topline za uzorak 3.,4.,5. i 6. primjenom Powe Mode postupka (3 mm)

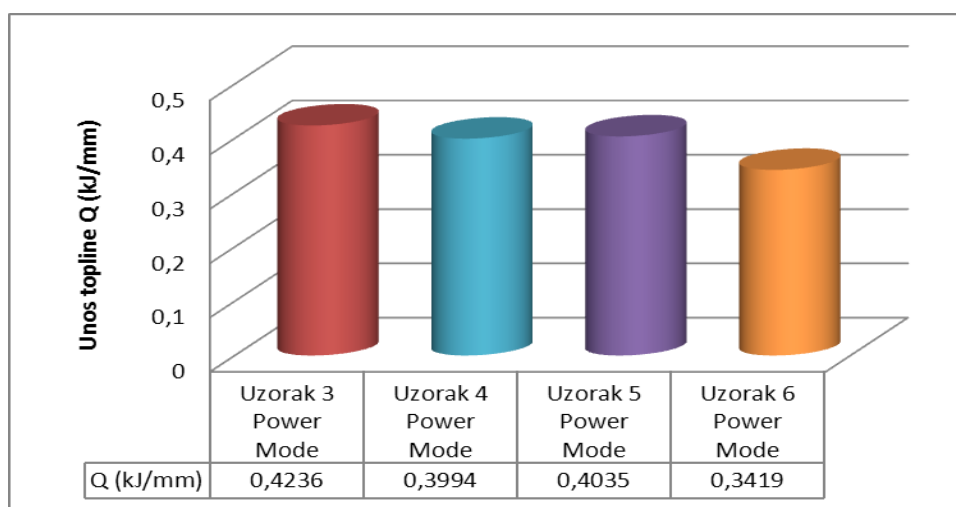
Uzorak 3.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
Power Mode	49	5	185
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0,4236	22		
Uzorak 4.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
Power Mode	59	6,5	220
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0,3994	21		
Uzorak 5.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
Power Mode	70	8	260
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0,4035	21,3		
Uzorak 6.			
Postupak -	Brzina zavarivanja (cm/min)	Brzina žice (m/min)	Struja (A)
Power Mode	83	8	265
Unos topline (kJ/mm)	Napon (V)		
0,3419	21		

Usporedba se vršila na temelju jednake brzine zavarivanja od 49 cm/min između uzoraka 1. (CV MAG) i 3. (Power Mode), gdje je unos topline kod CV MAG za 12% manji u odnosu na Power Mode postupak, te uzoraka 2. (CV MAG) i 4. (Power Mode) kod brzine zavarivanja od 59 cm/min gdje je unos topline za 4% manji kod Power Mode u odnosu na CV MAG postupak, što je prikazano na slici 35..



Slika 35. Unos topline u ovisnosti u postupku (CV MAG ili Power Mode) pri jednakim brzinama zavarivanja

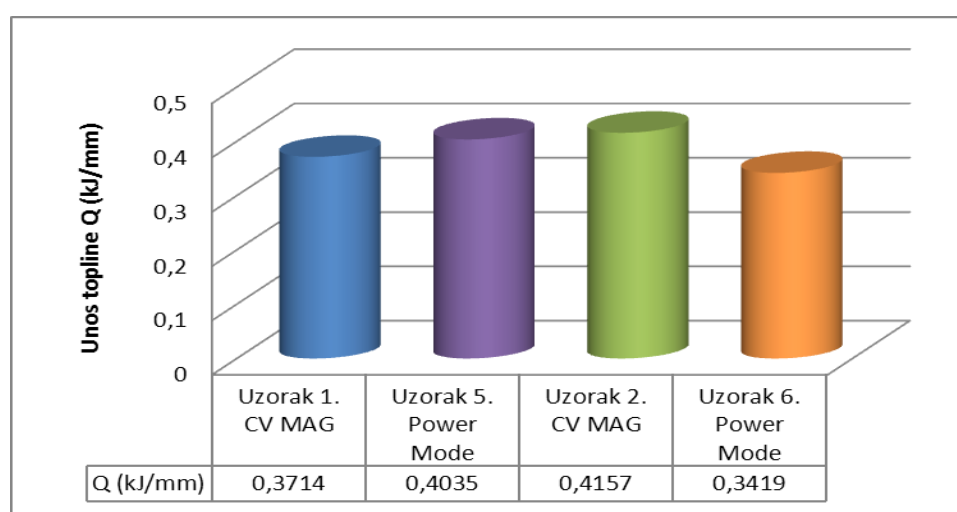
Uspoređivala se promjena unosa topline kod postupka Power Mode za različite brzine zavarivanja (49, 59, 70 i 83 cm/min) između uzoraka 3. i 4., 4. i 5., te 5. i 6., koji su prikazani na slici 36..



Slika 36. Unos topline u ovisnosti brzine zavarivanja kod postupka Power Mode

Povećan unos topline i to od 15% zabilježen je između uzoraka 5. (70 cm/min) i 6. (83 cm/min), dok je na ostalim uzorcima unos topline razlikuje do 6%.

Napravljena je još jedna usporedba unosa topline između CV MAG i Power Mode postupka između uzoraka 1. (CV MAG, pri brzini zavarivanja od 49 cm/min) i 5. (Power Mode, pri brzini zavarivanja od 70 cm/min) i uzorka 2. (CV MAG, pri brzini zavarivanja od 59 cm/min) i 6. (Power Mode, pri brzini zavarivanja od 83 cm/min) što je prikazano na slici 37., a unos topline pri Power Mode je smanjen od 8 do 17% u odnosu na CV MAG postupak.



Slika 37. Unos topline u zavisnosti od postupka (CV MAG ili Power Mode) pri različitim brzinama zavarivanja

4.4. Priprema uzoraka za ispitivanje

Da bi se mogli ispitati parametri zavora na uzorku, treba ih pripremiti. Priprema se odvija na sljedeći način:

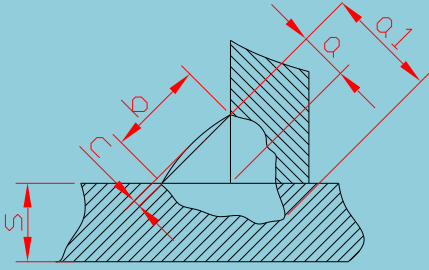
- Plinsko rezanje uzoraka za materijal debljine 8 mm,
- Rezanje uzoraka na kružnoj pili za materijal debljine 3 mm,
- Brušenje na grubo,
- Brušenje na fino sa brusnim papirom 120, 280, 400 i 600,
- Umakanje u 3% nitrala (na 100 ml nitrala ide 97% etilnog alkohola i 3 ml dušične kiseline HNO_3),
- Slikanje pod mikroskopom.

4.5. Usporedba dobivenih rezultata između CV MAG i modificiranih Rapid Arc i Power Mode postupka

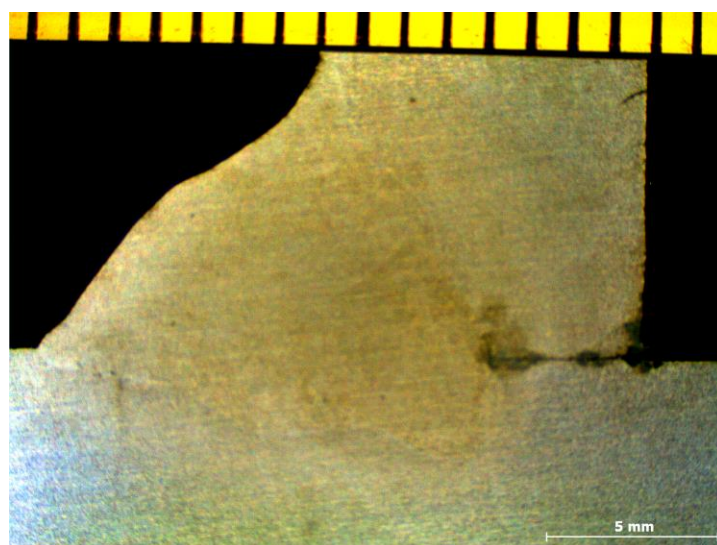
4.5.1. Usporedba dobivenih rezultata između CV MAG i Rapid Arc postupka

Parametri geometrije zavara prikazani su u tablicama 11. i 12. za CV MAG, a u tablicama 13. i 14. za Rapid Arc postupak.

Tablica 11. Prikaz parametara geometrije zavara uzorka 1. (8 mm)

					Uzorak 1	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					4,3	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavara b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavara a (mm)	Štv. deb zavara a_1 (mm)
CV MAG	8	T spoj	9,94	0,4	5	9,3

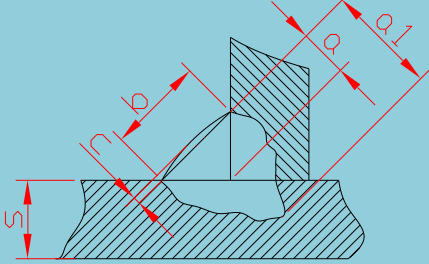
Na slici 38. prikazan je makroizbrusak uzorka 1. zavaren primjenom CV MAG postupka gdje je primjetna povećana zona utjecaja topline, nadvišenje nije pravilno po čitavom licu zavara dok su svi ostali parametri više nego odlični. Prilikom rada do deformacije materijala nije došlo kao ni do naljepljivanja uz minimalno štrcanje.



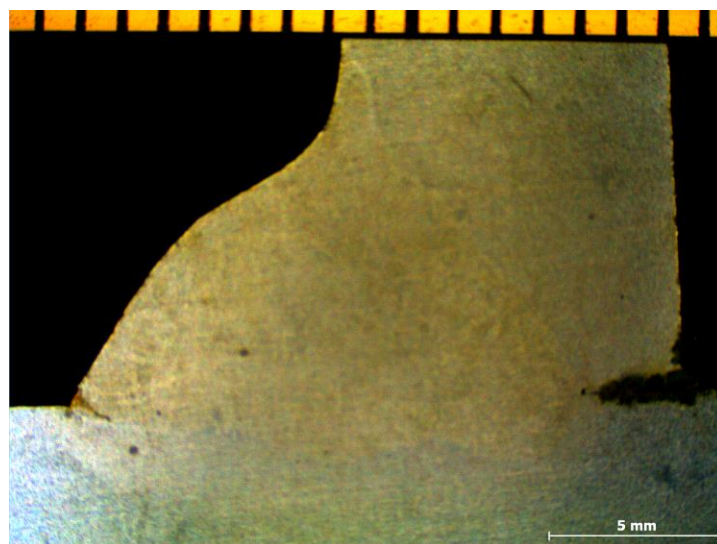
Slika 38.

Makroizbrusak uzorka 1. - CV MAG

Tablica 12. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 2. (8 mm)

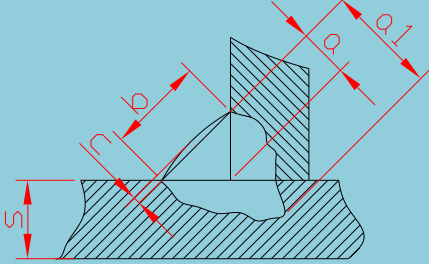
					Uzorak 2	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					4,2	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Štv. deb zavora a_1 (mm)
CV MAG	8	T spoj	10,8	0,42	5,22	9,44

Na slici 39. prikazan je makroizbrusak uzorka 2. zavaren primjenom CV MAG postupka gdje je također kao i na uzorku 1. došlo do povećane zone utjecaja topline i nepravilnog nadvišenja lica zavora. Geometrija zavora je vrlo dobra, da se zavarivalo sa obje strane sigurno bi došlo do potpunog provara. Prilikom rada nije bilo naljepljivanja kao ni deformacije materijala uz minimalno štrcanje.

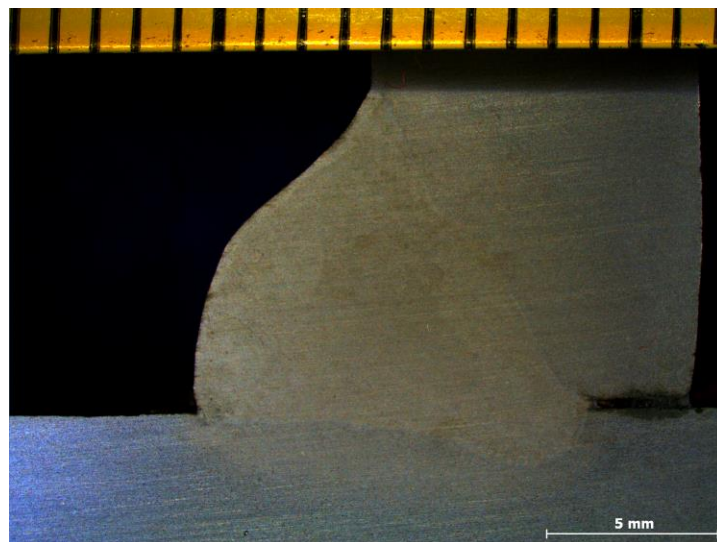


Slika 39. Makroizbrusak uzorka 2. - CV MAG

Tablica 13. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 3. (8 mm)

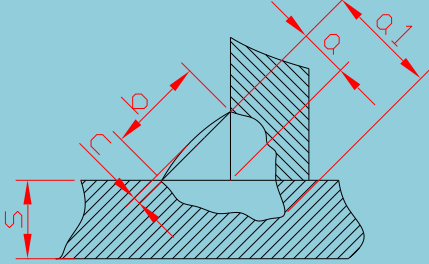
					Uzorak 3	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					4,14	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Stv. deb zavora a_1 (mm)
Rapid Arc	8	T spoj	9	1,33	3,78	7,92

Na slici 40. prikazan je makroizbrusak uzorka 3. zavaren primjenom Rapid Arc postupka na kojoj je vidljiva manja zona utjecaja topline zbog manjeg unosa topline u odnosu na postupak CV MAG, ali došlo je do povećeg povećanja nadvišenja, kao i kod CV MAG postupka da se zavarivalo i sa druge strane došlo bi do potpunog provara. Tijekom izvođenja zavarivanja štrcanje je bilo u prihvatljivim razmjerima, bez naljepljivanja i deformacije materijala. Geometrija zavora je solidna.

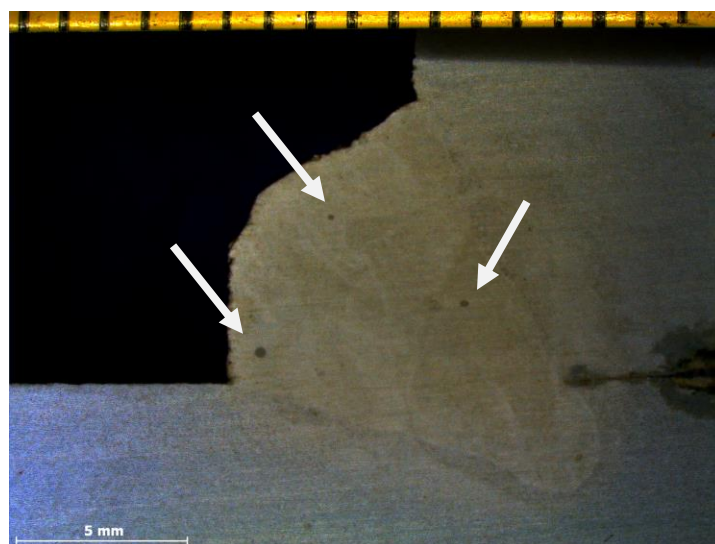


Slika 40. Makroizbrusak uzorka 3. - Rapid Arc

Tablica 14. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 4. (8 mm)

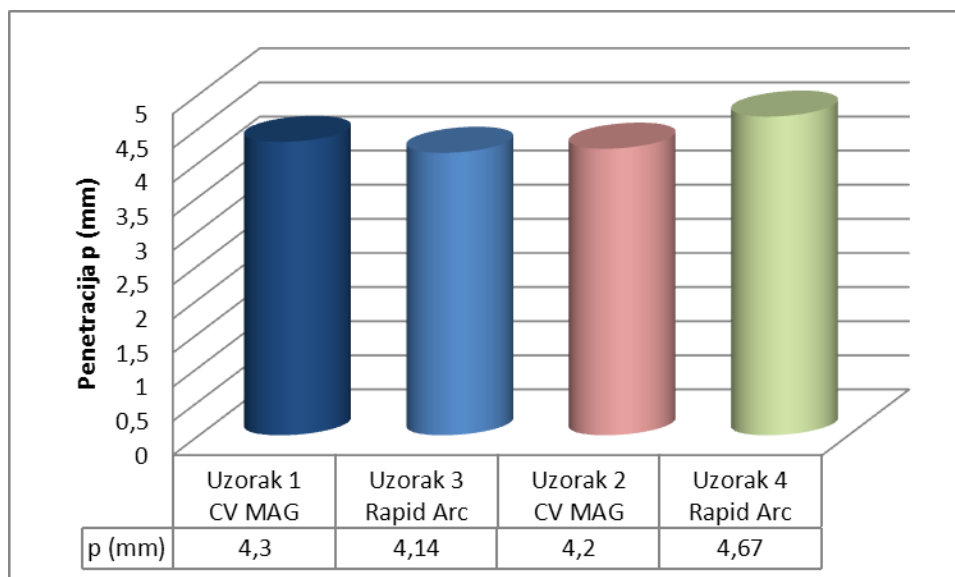
					Uzorak 4	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					4,67	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Stv. deb zavora a_1 (mm)
Rapid Arc	8	T spoj	8,18	1,85	3,74	8,41

Na slici 41. prikazan je makroizbrusak uzorka 4. zavaren primjenom Rapid Arc postupka gdje je također kao i kod uzorka 3. došlo do povećanog nadvišenja, zona utjecaja topline je smanjena u odnosu na prethodne uzorke, također kao i na pretkohnim uzorcima da se zavarivalo sa druge strane došlo bi do potpunog provara. Geometrija zavora solidna, pojavljivanje tri pore, bez deformacije materijala, štrcanje u prihvatljivim granicama.



Slika 41. Makroizbrusak uzorka 4. - Rapid Arc

Na sljedećoj slici 42. prikazana je usporedba između uzoraka 1. (CV MAG) i 3. (Rapid Arc), te 2. (CV MAG) i 4. (Rapid Arc) u pogledu penetracije. Iz koje se može zaključiti da je kod uzorka 1. penetracija veća od uzorka 3. za oko 4%, ali valja napomenuti da je i struja kod uzorka 1. bila veća za oko 20 % uz istu brzinu zavarivanja od 49 cm/min. Kod uzorka 2. i 4. bolju penetraciju ima uzorak 4. i to za oko 10 % uz povećanu brzinu zavarivanja s 49 cm/min na 59 cm/min uz manju struju zavarivanja od 10% i veću brzinu žice za 15%. Za detaljnije i pouzdanije rezultate trebalo bi izvršiti znatno više probnih zavora nego što je ovdje prikazano. Na temelju ovih podataka teško da se može zaključiti da li je postupak Rapid Arc toliko bolji od CV MAG postupka kao što to prikazuje proizvođač

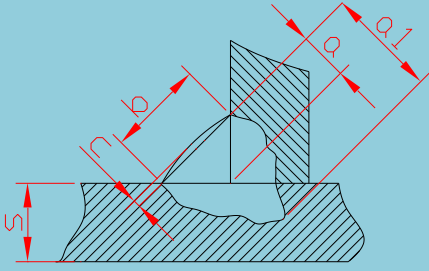


Slika 42. Penetracija u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Rapid Arc)

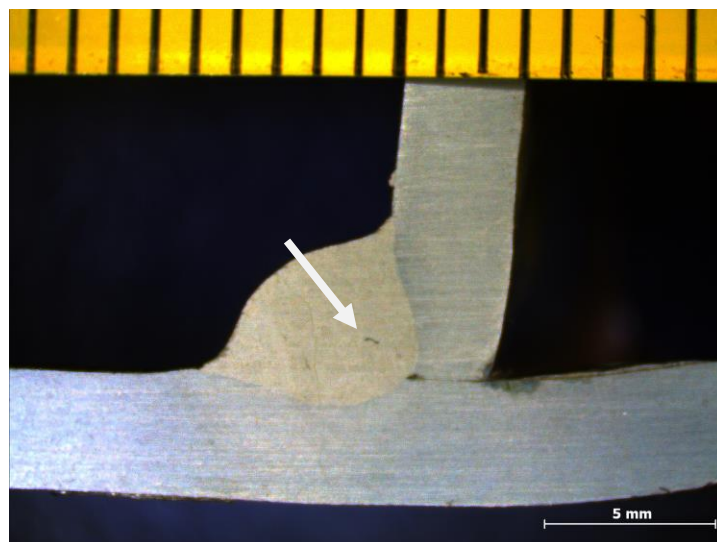
4.5.2. Usporedba dobivenih rezultata između CV MAG i Power Mode postupka

U tablicama 15. i 16. prikazani su parametri geometrije zavora dobiveni sa CV MAG postupkom a u tablicama 17., 18., 19. i 20. postupkom Power Mode.

Tablica 15. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 1. (3 mm)

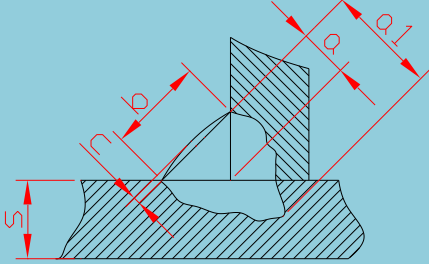
					Uzorak 1	
					Penetracija (a₁-a) (mm)	
					0,55	
Postupak	Debljina materijala <i>s</i> (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora <i>b</i> (mm)	Nadvišenje <i>c</i> (mm)	Nom. deb zavora <i>a</i> (mm)	Štv. deb zavora <i>a_I</i> (mm)
CV MAG	3	T spoj	5,92	0,78	2,62	3,17

Na slici 43. prikazan je makroizbrusak uzorka 1. zavaren primjenom CV MAG postupka. Primjetna je zadovoljavajuća kvaliteta zavarenog spoja uz solidne parametre geometrije zavora, te deformacije materijala koje su nastale uslijed zavarivanja, a koje bi bile smanjene da se zavarivalo i sa druge strane, bez naljepljivanja uz pojavu pore u zavaru.

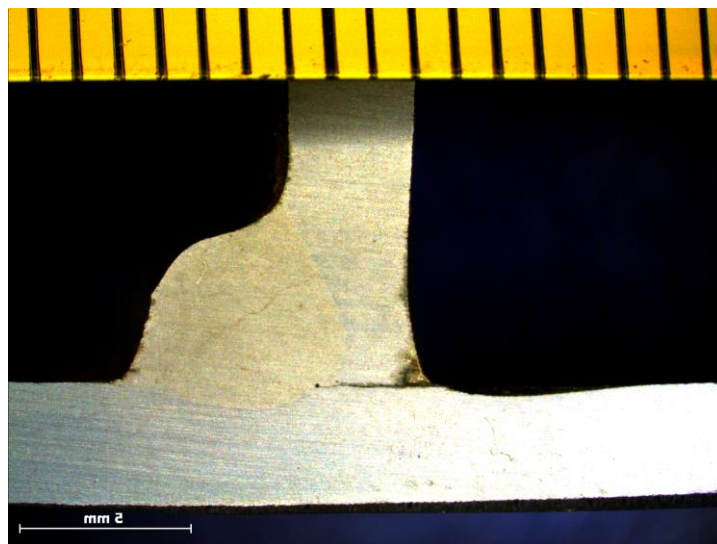


Slika 43. Makroizbrusak uzorka 1. - CV MAG

Tablica 16. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 2. (3 mm)

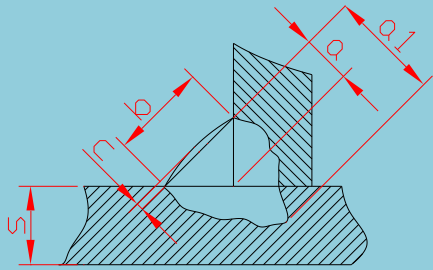
					Uzorak 2	
					Penetracija (a_1-a) (mm)	
					0,63	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Štv. deb zavora a_1 (mm)
CV MAG	3	T spoj	6,3	0,91	3,14	3,77

Na slici 44. prikazan je makroizbrusak uzorka 2. zavaren primjenom CV MAG postupka. Uz malu zonu utjecaja topline, ali povećano nadvišenje lica zavora, ostali parametri geometrije zavora su zadovoljavajući. Da se zavarivalo i sa druge strane došlo bi do potpunog provara. Zabilježene su manje deformacije materijala nego kod uzorka 1. i zabilježena je bolja penetracija.

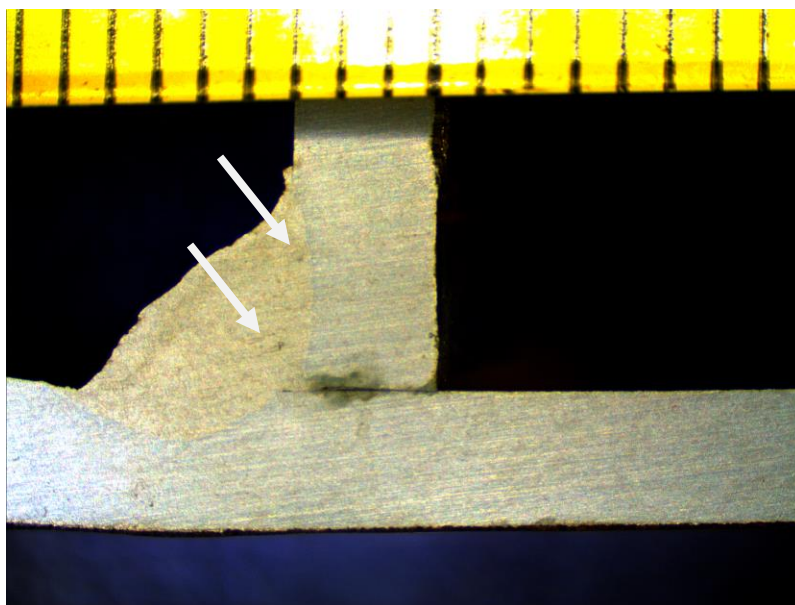


Slika 44. Makroizbrusak uzorka 2. - CV MAG

Tablica 17. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 3. (3 mm)

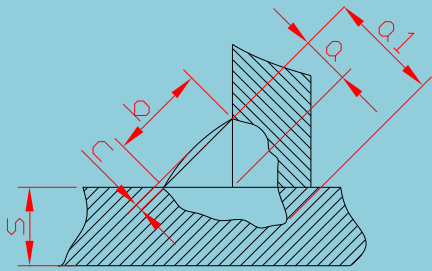
					Uzorak 3	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					0	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Štv. deb zavora a_1 (mm)
Power Mode	3	T spoj	6,56	0,23	3,3	3,3

Na slici 45. prikazan je makroizbrusak uzorka 3. zavaren primjenom Power Mode postupka. Pri kojem je došlo samo do taljenja rubova materijala ne i do penetracije, pojava dviju pora u zavaru. Prilikom zavarivanja nije bilo prevelikog štrcanja, deformacija materijala manja nego kod uzorka 1., a do naljepljivanja nije došlo.

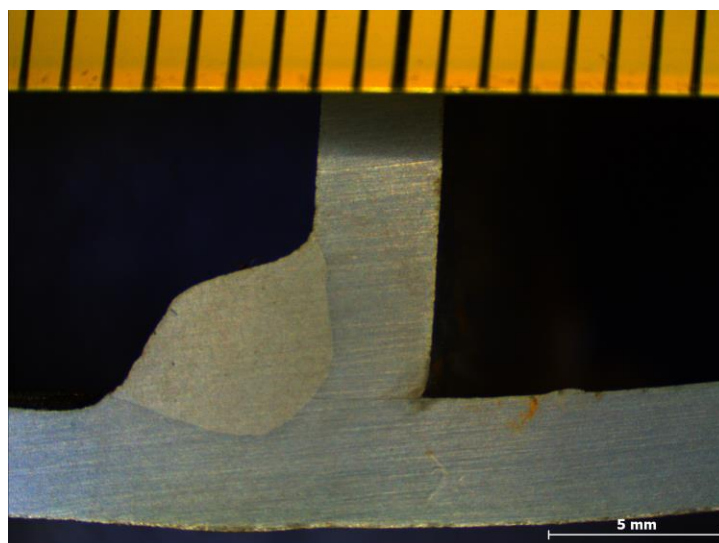


Slika 45. Makroizbrusak uzorka 3. - Power Mode

Tablica 18. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 4. (3 mm)

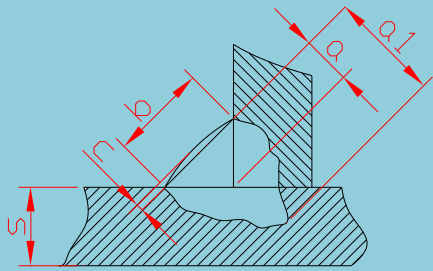
					Uzorak 4	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					0,23	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Štv. deb zavora a_1 (mm)
Power Mode	3	T spoj	6,16	0,91	2,87	3,1

Na slici 46. prikazan je makroizbrusak uzorka 4. zavaren primjenom Power Mode postupka iz koje je vidljiv lijep izgled zavora uz nešto manju penetraciju. Tijekom zavarivanja nije dolazilo do štrcanja a ni do prevelike deformacije materijala.

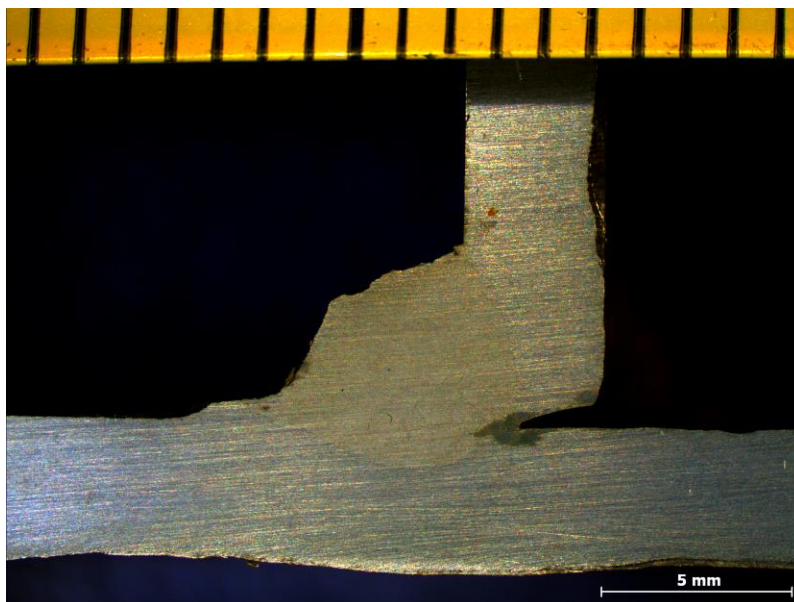


Slika 46. Makroizbrusak uzorka 4. - Power Mode

Tablica 19. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 5. (3 mm)

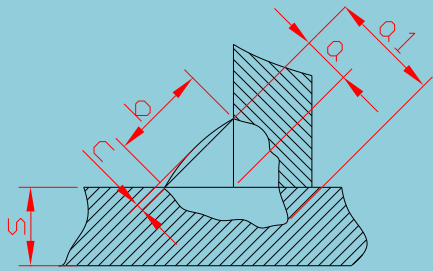
					Uzorak 5	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					0,46	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Štv. deb zavora a_1 (mm)
Power Mode	3	T spoj	5,78	0,83	3,07	3,53

Na slici 47. prikazan je makroizbrusak uzorka 5. zavaren primjenom Power Mode postupka koji estetski baš i nije prihvatljiv uz nadvišenje lica zavora, deformacije materijala jedino je prihvatljiva solidna penetracija i to što tijekom zavarivanja nije bilo prevelikog prskanja, ali moramo uzeti u obzir brzinu zavarivanja od 70 cm/min sa kojom se je zavarivalo uz struje od 260 A.

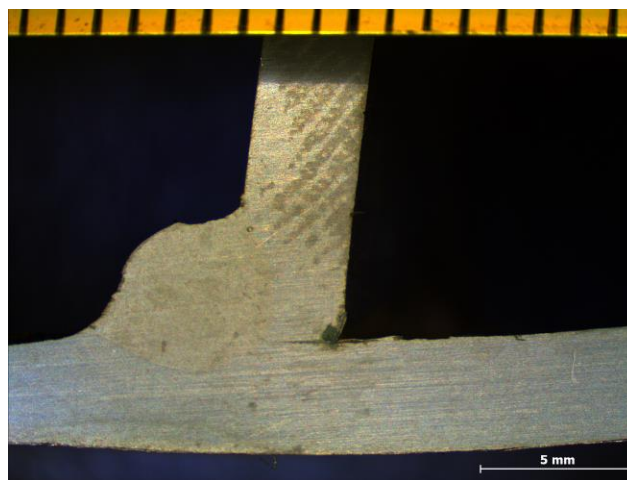


Slika 47. Makroizbrusak uzorka 5. - Power Mode

Tablica 20. Prikaz parametara geometrije zavora uzorka 6. (3 mm)

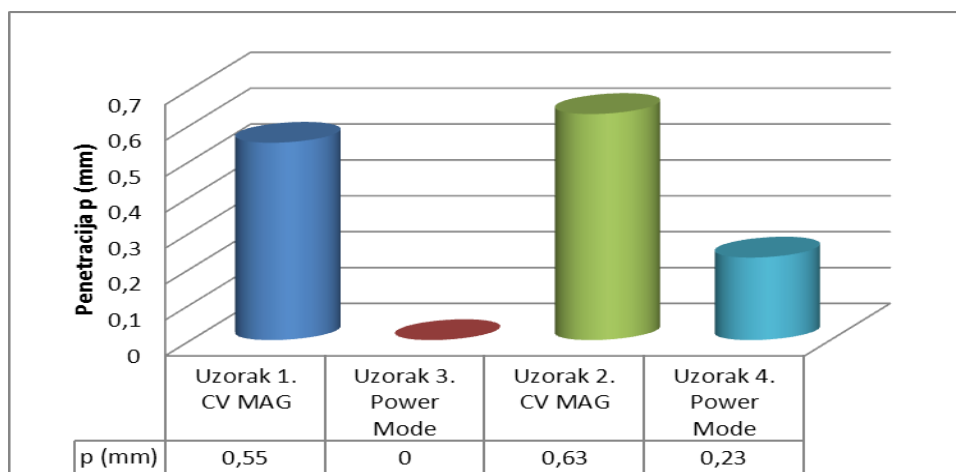
					Uzorak 6	
					Penetracija ($a_1 - a$) (mm)	
					0,83	
Postupak	Debljina materijala s (mm)	Vrsta spoja -	Širina zavora b (mm)	Nadvišenje c (mm)	Nom. deb zavora a (mm)	Štv. deb zavora a_1 (mm)
Power Mode	3	T spoj	5,7	0,88	2,52	3,35

Na slici 48. prikazan je makroizbrusak uzorka 6. zavaren primjenom Power Mode postupka na kojoj je vidljiva deformacija materijala koja ne bi bila tako izražena da se zavarivalo i sa druge strane, povećano nadvišenje lica zavora i relativno dobar zavar uzimajući u obzir brzinu zavarivanja od 83 cm/min i odlična penetracija.



Slika 48. Makroizbrusak uzorka 6. - Power Mode

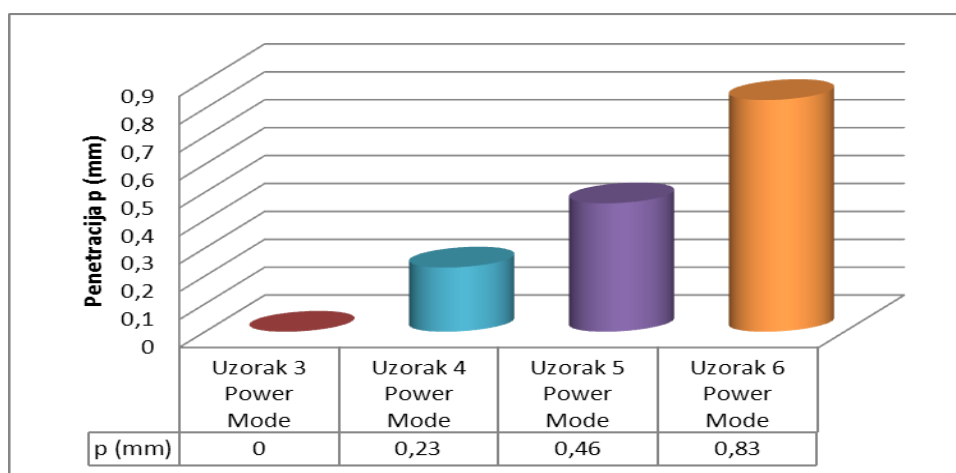
Uspoređivala se penetracija pri jednakoj brzini zavarivanja i brzini žice između uzoraka 1. (CV MAG) i 3. (Power Mode), gdje je brzina zavarivanja 49 cm/min, a brzina žice 5 m/min, te između uzoraka 2. (CV MAG) i 4. (Power Mode), gdje je brzina zavarivanja 59 cm/min, a brzina žice 6.5 m/min što je prikazano na slici 49..



Slika 49. Penetracija u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Power Mode) pri jednakoj brzini zavarivanja i brzini žice

Penetracija je za 100% veća između uzoraka 1. 3., te za 63% između uzoraka 2. i 4. uz veću struju kod CV MAG u odnosu na Power Mode postupak u iznosu od 5%.

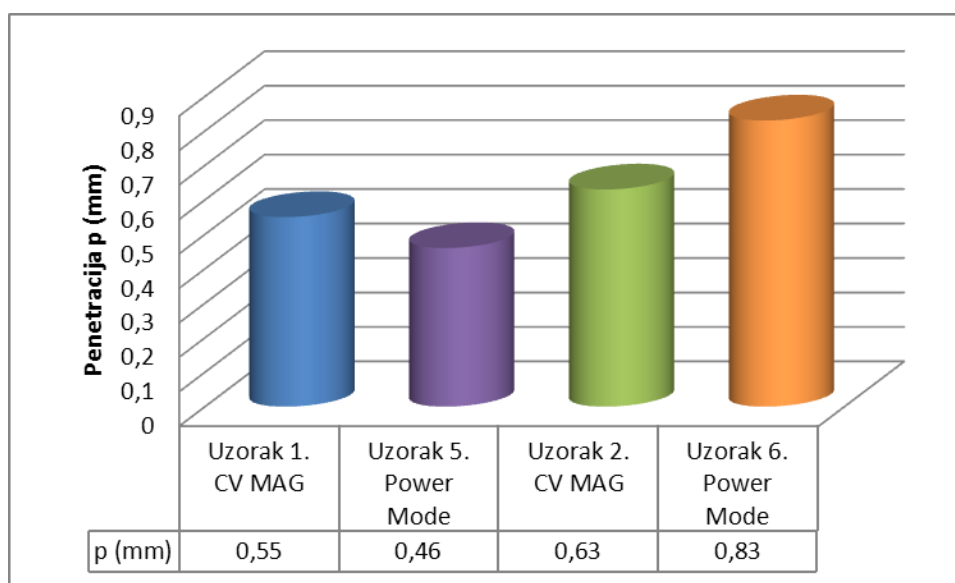
Usporedba Power Mode postupka za različite brzine zavarivanja i brzine žice između uzoraka 3. i 4., 4. i 5., te 5. i 6., prikazana je na slici 50.



Slika 50. Penetracija u ovisnosti brzine zavarivanja i brzine žice kod Power Mode postupka

Penetracija se povećava kako se povećava brzina zavarivanja (49, 59, 70 i 83 cm/min), brzina žice (5, 6,5, 8 m/min) i jakost struje (185, 220, 260, 255 A).

Napravljena je još jedna usporedba u pogledu penetracije pri različitoj brzini zavarivanja i brzini žice između uzoraka 1. (CV MAG) i 5. (Power Mode), te između uzoraka 2. (CV MAG) i 6. (Power Mode) što je prikazano na slici 51..



Slika 51. Penetracija u ovisnosti o postupku (CV MAG ili Power Mode) i brzini zavarivanja

Kod uzorka 1. (CV MAG) penetracija je veća za 16% od uzorka 5. (Power Mode) pri različitoj brzini zavarivanja (49, 70 cm/min), brzini žice (5, 8 m/min), te manjoj jakosti struje od 25%. Kod uzorka 6. (Power Mode) penetracija je veća za 24% od uzorka 2. (CV MAG) pri različitoj brzini zavarivanja (83, 59 cm/min), brzini žice (8, 6,5 m/min), te većoj jakosti struje od 13%.

5. ZAKLJUČAK

Proizvođači opreme za zavarivanje potaknuti konkurencijom i zahtjevima industrije neprestano ulažu u razvoj modificiranih MAG postupaka. Na temelju pet obrađenih modificiranih MAG postupaka može se zaključiti da se razvoj bazira na suvremenim izvorima struje za zavarivanje sa detaljnim upravljanjem strujom i naponom i da im je cilj smanjenje unosa topline, manje deformacije, zavarivanje raznorodnih materijala, bez prskanja, ušteda energije, kvaliteta zavarenog spoja, povećana produktivnost, konstantna dubina protaljivanja, velike brzine zavarivanja, korijensko zavarivanje, zavarivanje većih razmaka i smaknuća, itd..

Svijet je postao jedno veliko tržište na kojem mogu opstati samo ona poduzeće, koja zadovoljavaju kriterije kvalitete, cijene i roka isporuke. Da bi se mogli ispuniti ti uvjeti potrebno je primjenjivati visokoproduktivne postupke zavarivanja koji smanjuju troškove izrade, smanjuju potrebno vrijeme za izobrazbu ljudi koji će raditi na takvom postupku, povećavaju produktivnost i osiguravaju potrebnu kvalitetu zavarenih spojeva.

U eksperimentalnom dijelu rada provela se usporedba između konvencionalnog MAG i Rapid Arc postupka u pogledu unosa topline i geometrije zavara gdje se je došlo do zaključka da Rapid Arc postupak ima manji unos topline i preko 30% u odnosu na CV MAG sa manjom zonom utjecaja topline, što se tiče prskanja, deformacija, nema nekih prevelikih razlika u odnosu na CV MAG postupak, penetracija je bolja kod Rapid Arc postupka i to do 10%, ali pojavile su se pore u zavarenom spoju, izgledi zavara kod oba postupka daju zadovoljavajuće rezultate.

Provela se i usporedba između CV MAG i Power Mode postupka gdje se očituje razlika u unosu topline za 15% koji je manji kod Power Mode postupka, štrcanje podjednako, deformacije su bile čak veće kod Power Mode postupka a penetracija manja kod jednakih brzina zavarivanja, povećanjem brzine zavarivanja povećala se i penetracija uz loš izgled zavara kod Power Mode postupka.

Na temelju provedene usporedbe CV MAG s Rapid Arc i Power Mode postupcima može se zaključiti da razlike nisu toliko značajne da bi se postupci ekonomski isplatili.

6. LITERATURA

- [1] *GMAW Welding Guide*,
http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf, 1.8.2013.
- [2] Mirko Gojić: *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, Sisak, 2003.
- [3] S.Kralj, Š. Andrić: *Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka*, Zagreb, 1972.
- [4] Milan Milotić: *Priručnik za zavarivače*, Dobož, 2008.
- [5] A. Majstorović, M. Jovanović: *Osnovi zavarivanja, lemljenja i lepljenja*, Beograd, 1995.
- [6] *Guidelines For Gas Metal Arc Welding*,
http://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf, 1.8.2013.
- [7] Marijan Rudan, *Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom*, 4. Seminar, Čelici otporni na koroziju, Pula, 2007.
- [8] *Zaštitni plinovi za zavarivanje*, www.messer.ba, 1.8.2013
- [9] Garašić I, Kralj S, Kožuh Z: *Časopis za zavarivanje i srodne tehnike*, Zagreb, svibanj – kolovoz 2011. (Vol.) 54., str. 61 - 67
- [10] Bruce D. DeRuntz: *Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry*, <http://www.atmae.com/jit/Articles/deruntz073003.pdf>, 1.8.2013.
- [11] *Surface Tension Transfer*, <http://www.treatrade.hr/pdf/DM/stt.pdf>, 1.8.2013.
- [12] *Surface Tension Transfer*,
<http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf>, 1.8.2013.
- [13] Majurec I.: *Izvještaj o uvođenju STT postupka zavarivanja u izradi cijevi u brodogradilištu 3. MAJ*, Rijeka, 2006.
- [14] *Pro News Kemppi customer magazine*,
[http://www.kemppi.com/inet/kemppi/contman.nsf/documents/0EAF654BDF3496D1C225720C0041FDF0/\\$file/ProNews_2_06_EN.pdf](http://www.kemppi.com/inet/kemppi/contman.nsf/documents/0EAF654BDF3496D1C225720C0041FDF0/$file/ProNews_2_06_EN.pdf), 1.8.2013.
- [15] Kah Paul Chu: *Welding of Sheet metal using Modified short arc MIG/MAG welding process*, <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/46902/nbnfi-fe200909012068.pdf?sequence=1>, 1.8.2013.
- [16] Rapid MAG Technology, http://www.ess-schweisstechnik.de/en/technologies/ess_rmt,388,67.php, 1.8.2013.

- [17] *Rapid Arc*, <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/nx280.pdf>, 1.8.2013.
- [18] *Power Mode*, <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX260.pdf>, 1.8.2013.
- [19] *Wave Form Controlled Technology*, <http://www.scribd.com/doc/144866030/STT-Lincoln-Electric> 1.8.2013.
- [20] *WaveForm Controlled Technology*, <http://www.gladwintank.com/NX110.pdf>, 1.8.2013.
- [21] *Power Wave S350CE*, <http://servicenavigator.lincolnelectric.eu/files/docs/1083.pdf>, 1.8.2013.
- [22] *Linc Feed 45*, <http://content.lincolnelectric.com/en/pdfs/products/literature/LF45-eng.pdf>, 1.8.2013.
- [23] Slike koje nemaju naveden izvor uradio je autor ovog rada
- [24] *Rapid Arc*, <http://www.youtube.com/watch?v=tRu2Fyv5bUA&list=PLECA0D03D8F9ACB0A>, 1.8.2013.

7. PRILOZI

- I. CD-R disc – pdf verzija završnog rada i slike makroizbrusaka